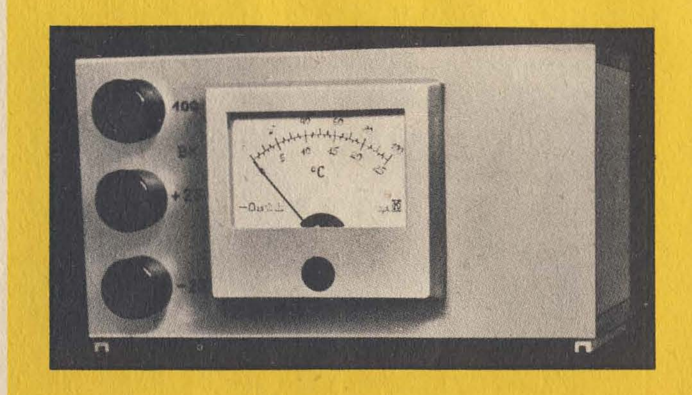




Bauplan Nr. 34
Preis 1,– Mark

Elektronische Thermometer

Karl-Heinz Bläsing
Klaus Schlenzig

Originalbauplan Nr. 34

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Die Temperatur gehört zu den Einflußgrößen, die gleichermaßen für den Menschen und seine Lebensbedingungen wie für technische Erzeugnisse von großer Bedeutung sind. Information über die Höhe der an einem bestimmten Ort gerade herrschenden Temperatur ist daher in vielerlei Weise wichtig, entweder als Auslösung für eine entsprechende Reaktion des Menschen oder zum Einleiten eines Regel-, also Ausgleichvorgangs. Temperatur ist eine »Zustandsgröße«, die – das kann man in jedem Physikbuch nachlesen – einen Zustand beschreibt, der weder von der Masse noch von der Zusammensetzung des jeweiligen Körpers abhängt. Je nach der örtlichen Zu- oder Abfuhr von Wärmeenergie kann praktisch jeder Punkt eines Körpers eine andere Temperatur annehmen, doch das ist wiederum mit einem von den Bedingungen (Wärmetransport) abhängigen Ausgleichvorgang auf und in diesem Körper verbunden. Man denke nur an die hohe Temperatur, die ein dunkler, sonnenbestrahlter Gegenstand annehmen kann, besonders hinter einer Glasscheibe. Die Temperatur der Glasscheibe ist eine andere als die der sonnenbeschienenen Oberfläche, und diese wiederum hat eine andere Temperatur als die unbestrahlte Rückseite. Auch die Luft in der Umgebung nimmt einen bestimmten Temperaturwert an.

Es soll nun keine tiefgründige physikalische Abhandlung über Wärmelehre folgen. Vielmehr läßt sich aus dem Beispiel ein sehr praktischer Schluß ziehen: Wer Auskunft über die Höhe einer Temperatur erhalten möchte, der muß genau wissen, an welchem Ort und unter welchen Bedingungen das geschieht. Ein intensiv von der Sonne bestrahltes Außenthermometer vor einer dunklen Wand wird nie die Lufttemperatur anzeigen, sondern einen wesentlich höheren Wert. Die große Wärmekapazität eines Wasserbassins führt dazu, daß dieses Wasser erst nach einer relativ langen Zeit die Temperatur seiner Umgebung angenommen hat. Die Temperatur eines kleinen Gegenstands geringer Masse kann man mit einem Thermometer ähnlicher Dimensionen, noch dazu bei nur punktförmiger Berührung, nie auch nur annähernd richtig messen! Jede Temperaturmeßaufgabe setzt also der Sache angemessene Mittel voraus. Bereits das letztgenannte Problem kann erst mit Hilfe der Elektronik befriedigend gelöst werden. Ihre größte Berechtigung haben elektronische Thermometer jedoch bei den vielfältigen Aufgaben der Fernmessung und -regelung.

1. Grundlagen

Lange mußte sich der Mensch damit zufriedengeben, die Innentemperatur seiner Wohnung oder der Luft vor seinem Fenster unmittelbar am Ort zu kontrollieren, also durch einen Blick auf ein Thermometer, das nach dem Prinzip der Volumenänderung von Substanzen unter Wärmeeinfluß funktioniert. Ein solches Thermometer enthält z. B. Quecksilber oder gefärbten Alkohol oder einen Streifen aus zwei Metallen mit unterschiedlichem Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Quecksilber als Leiter und das eben beschriebene »Bimetall« boten bereits Möglichkeiten der elektrischen Fernmessung (und -regelung) einer bestimmten, bei größerem mechanischem Aufwand auch (aber nur am Meßort!) vorwählbaren Temperatur. Quecksilberthermometer mit eingeschmolzenen Elektroden als Kontaktthermometer oder auch von außen verschiebbarer Gegenelektrode sind bekannt; beim Bimetallstreifen erinnert man sich sofort an das »Reglerbügeleisen« mit seiner »2-Punkt«-Charakteristik. Bei ihm liegt bereits ein ganz einfacher, selbständig arbeitender Regelkreis vor. Bei zu hoher Temperatur hebt der Bimetallkontakt so lange ab, bis eine entsprechende Abkühlung stattgefunden hat. Tabelle 1 enthält einige Beispiele von linearen Ausdehnungskoeffizienten.

An dieser Stelle erscheint es angebracht, auf die neueren gesetzlichen Festlegungen zu physikalisch-technischen Einheiten hinzuweisen, an die man sich auch als Amateur gewöhnen muß. Das Wichtigste findet man in der Broschüre von Fischer/Padelt/Schindler: Physikalisch-technische Einheiten – richtig angewandt (VEB Verlag Technik, Berlin 1975). Daraus geht hervor: Jeder Temperaturpunkt läßt sich sowohl durch seine Temperatur (in K = Kelvin) als auch durch seine Celsius-Temperatur (in °C) angeben, z. B. $T = 0\,K \triangleq t = -273{,}15\,°C$; $T = 373{,}15\,K \triangleq t = +100\,°C$. Temperaturangaben in K und in °C dürfen nicht durch Gleichheitszeichen verbunden werden. Bei Temperaturdifferenzen dagegen gilt: $1\,K = 1\,°C$, denn Temperaturskale und Celsius-Temperaturskale haben gleiche Skalenteilung. Bei abgeleiteten Einheiten (z. B. Temperaturkoeffizient TK) handelt es sich meist um Temperaturdifferenzen. Man muß sie stets in Kelvin angeben. Die Angabe von Temperaturtoleranzen dagegen kann in Grad Celsius erfolgen, wenn der Temperaturpunkt in °C angegeben ist: $t = (20 \pm 1)\,°C$ entspricht $T = (293{,}15 \pm 1)\,K$. Dennoch sollte die Angabe der Toleranz in K bevorzugt werden, denn sie entspricht der bisher üblichen Schreibweise $20\,°C \pm 1\,K$ bzw. $T = 293{,}15\,K \pm 1\,K$. Allgemein gilt $T = nK \triangleq t = (n + 273)\,°C$. Bis 1967 dagegen sprach man im Falle der Anwendung des Kelvin bei Temperaturangaben noch von °K und bei Temperaturdifferenzen und -toleranzen von grd. Diese »Zweigleisigkeit« ist überholt. Kelvin ist Einheit für Temperaturpunkte, aber auch für Temperaturbereiche (Temperaturdifferenzen). Erst die zusätzliche verbale Angabe läßt allerdings die Unterscheidung zu, ob Skalenwert oder Differenzgröße gemeint ist.

Für den Bauplanleser jedenfalls folgt: Thermometerskalen können auch weiterhin in der bewährten Weise mit °C beschriftet werden, statt von grd bei Toleranzen und Differenzen spricht man jedoch besser von K.

Mit diesen Mindestvoraussetzungen ausgerüstet, fragen wir uns nun, an welchen elektronischen Einrichtungen diese Angaben angebracht werden können, auf welche Weise sich also Temperaturen als »nichtelektrische Größe« elektrisch anzeigen lassen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der 1- oder 2-Punkt-Anzeige (Signalisierung der Über- oder Unterschreitung einer vorgewählten Temperatur, vgl. bereits erwähnte Kontaktthermometer) und der »Analoganzeige« z. B. an einem Drehspulmeßwerk. Als modernste Möglichkeit schließlich, die über den Rahmen dieses Bauplans gegenwärtig leider noch hinausgeht, ist die Ziffernanzeige des Meßwerts zu nennen.

Jede dieser Anzeigearten hat gewisse Ungenauigkeiten. Bei der scheinbar extrem genauen Analoganzeige muß man bedenken, daß sich eine kleinere Differenz als eine Zeigerbreite kaum erkennen läßt. Von der Reibung des beweglichen Teils hängt es auch ab, ob eine eingetretene Veränderung überhaupt den Zeiger zu bewegen vermag. Lagerspiel u. a. führen dazu, daß zwei gleiche Werte nacheinander unterschiedliche Anzeige ergeben können. Die Kupferspule eines Drehspulmeßwerks hat einen von der Temperatur abhängigen Widerstand (wir kommen darauf noch zurück), so daß eine konstante Meßspannung zu einem temperaturabhängigen Ausschlag führt. Hinzu kommen die Fehlermöglichkeiten von der Meßstelle an über den (falls vorhanden) Meßverstärker mit seinen Abhängigkeiten von Temperatur- und Versorgungsspannung. Als Konsequenz all dieser Unvollkommenheiten

ergibt sich: Alle beeinflußbaren Fehlerquellen sind in ihrer Wirksamkeit so weit einzuschränken, daß sie insgesamt das Ergebnis nur in solchen Grenzen unsicher machen, die für die Auswertung noch ohne Bedeutung, tragbar oder einzukalkulieren sind.

Fühler mit großen, reproduzierbaren Reaktionen auf eine Temperaturänderung verringern von vornherein die Bedeutung von Fehlern der Anzeigeseite; allerdings sind mit diesem Vorteil meist andere Nachteile verbunden (z. B. größere Nichtlinearität, erhebliche Zeitkonstanten).

Für die elektronische (Fern-) Messung von Temperaturen kommen im wesentlichen folgende Meßfühler in Frage.

1.1. Leiter

Der Widerstand eines Leiters bei einer von 20 °C abweichenden Temperatur ϑ ergibt sich mit für uns ausreichender Genauigkeit aus $R = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha_{20} (\vartheta - 20\,°C)$; α_{20} ist darin der für den im vorliegenden Bauplan interessierenden Temperaturbereich gültige Temperaturkoeffizient (TK) des Widerstands, gemessen in 1/K. Bei dem am meisten interessierenden Kupfer ist $\alpha_{20} = 3{,}93 \cdot 10^{-3}$, andere Metalle weichen nur wenig davon ab. Speziallegierungen (Konstantan u.a.), die für genaue Widerstände gebraucht werden, haben dagegen einen wesentlich geringeren TK (bis zu 3 Zehnerpotenzen!). Ausreichend genau kann man also z. B. für Kupfer mit 4 ‰ Widerstandszunahme gegenüber 20 °C bei 1 K Temperaturzunahme rechnen. Das bedeutet für eine Erwärmung um 100 K (also auf 120 °C) 40%! Praktisch wird diese schon mit einem Ohmmeter sehr gut meßbare Widerstandsänderung z. B. zum Messen der Betriebstemperatur von Wicklungen bei Transformatoren und Motoren ausgenutzt, und der Amateur kann sich dieser Möglichkeit bedienen. Selbstverständlich muß man vorher den »Kaltwiderstand« bei bekannter Temperatur (möglichst 20 °C) messen, sonst fehlt ja die Bezugsgröße.

Soll ein solcher Meßfühler hergestellt werden, so ist als Richtwert (im Rahmen der Drahttoleranzen daher anschließend durch Messen genauer festzustellen) der Widerstand je Meter Drahtlänge von Interesse, wie ihn Tabelle 2 angibt.

Da man den Draht für einen solchen Fühler meist aufwickeln wird, um eine kleine, kompakte Sonde zu erhalten, soll der Vollständigkeit halber an die Induktivität dieser Spule erinnert sein. Sie führt zu Veränderungen im Meßergebnis, wenn man den Widerstand z. B. mit einer wechselspannungsgespeisten Brücke messen will. (Außerdem fängt eine solche Spule magnetische Wechselfelder auf. Gegenmittel: bifilar wickeln!)

Meßfühler aus Kupferdraht eignen sich gut z. B. für die Fernmessung in leitenden Flüssigkeiten bei höherer Temperatur (z. B. Siedepunkt von Wasser), wenn durch entsprechende Gestaltung erst außerhalb des leitenden Mediums der Anschluß der Leitung erfolgt. Diese Lötstellen lassen sich nämlich schwierig wasserdicht umhüllen, so daß beim Messen ein Nebenschluß über die Flüssigkeit entstehen kann.

1.2. Leiterverbindungen, Thermoelektrizität

Während es sich bei 1.1. im Sinne unserer Aufgabenstellung um »passive Temperaturfühler« handelte, ist die Verbindung zweier Metalle (z. B. gelötet, besser aber geschweißt, denn dann ist kein 3. Metall beteiligt!) ein Thermoelement (Bild 1). Am wirksamsten sind Verbindungen von Eisen und Konstantan oder Nickel und Chromnickel. Als zweckmäßiger für eine einfache Gestaltung erweist sich jedoch die Paarung Kupfer/Konstantan. Gemäß Bild 1 bestehen die Zuleitungen zum Instrument dann wieder aus Kupfer, wodurch keine zusätzlichen »parasitären« Thermoelemente auftreten können. Die auf Platin bezogene thermoelektrische Spannungsreihe (in Tabelle 3 für den Bereich von 0 bis 100 °C) gibt Auskunft über die bei den Paarungen zu erwartenden Werte. Kupfer/Konstantan liefert also bei einen Temperaturunterschied der Meßstellen $\vartheta_1 - \vartheta_2$ in Bild 1 von 100 K 0,76 mV − (−3,4 mV) = 4,16 mV. Der Verlauf über der Temperatur ist nicht streng linear, Amateurbelangen genügt aber im allgemeinen die Voraussetzung einer linearen Abhängigkeit zwischen U und ϑ.

Wichtigste Tatsache bei Thermoelementen ist der Umstand, daß die Anzeige nie einem absoluten

Temperaturwert, sondern stets der Temperaturdifferenz zwischen wärmerer und kälterer Meßstelle entspricht. Für normale Ansprüche reicht es meist, die Vergleichsstelle z. B. in einem vor schnellen Temperaturschwankungen (z. B. zugluftbedingt!) geschützten Ort zusammen mit einem Zimmerthermometer möglichst kleiner Anzeigeträgheit unterzubringen. Der angezeigte Meßwert gibt dann die Übertemperatur zu diesem Punkt an. Beispiel: Meßwert 0,41 mV, Vergleichsstelle 20 °C, Paarung Kupfer/Konstantan. Ergebnis: 0,41 mV ≙ 10 K, also hat der Meßpunkt eine Temperatur von 30 °C. Die Problematik von Thermofühlern dieser Art liegt in der recht kleinen Quellspannung, abgesehen von der nötigen Vergleichsmeßstelle. Der Anwender muß entweder über ein niederohmiges Meßinstrument kleinen Spannungsbedarfs verfügen, z. B. 5 mV Vollausschlag bei 20 °C; man berücksichtige die Änderung dieses Wertes mit der Temperatur auf Grund der Kupferspule für einen Temperaturbereich von 120 K! Typischer Innenwiderstandswert um 25 Ω, oder er muß diese kleinen Spannungen möglichst fehlerfrei verstärken. Ein dafür geeigneter Verstärker darf auf Änderungen von Umgebungstemperatur und Versorgungsspannung nur äußerst wenig reagieren. Davon bedingte Änderungen am Ausgang müssen genügend weit unter dem bleiben, was vom Meßfühler (gewünscht) verursacht wird. Beispiel: Etwa 40 µV/K betrage die Fühlerspannung. Der Umgebungstemperaturbereich der Meßeinrichtung liege zwischen 15 °C und 35 °C. Das bedeutet ±10 K »Umgebungstemperaturhub«. Zur Verstärkung möge ein Operationsverstärker mit ausreichend gut stabilisierten Betriebsspannungen dienen. Seine Offsetdrift betrage 4 µV/K. Würde man nun in der Meßeinrichtung dafür keine Korrekturmöglichkeit (also Abgleich bei der gerade herrschenden Temperatur) vorsehen, so ergäbe das ± 40 µV Fehler im Betriebstemperaturbereich, also – bezogen auf die Meßfühlerempfindlichkeit – eine Anzeigeunsicherheit von ±1 K. Dieser Wert entspricht etwa der Genauigkeit, die übliche Zimmerthermometer erreichen, ist also für viele Zwecke bereits annehmbar!

Mit einem Nullabgleich vor jeder Messung läßt sich dieser Fehler aber drastisch reduzieren.

1.3. Monokristalline Halbleiter: pn-Übergang

In Flußrichtung betriebene Halbleiterflächendioden, z. B. auch die Kollektor-Basis-Strecken von Transistoren, zeigen bei konstantgehaltenem Durchlaßstrom eine von der Temperatur abhängige Durchlaßspannung. Richtwert: Abnahme bei zunehmender Temperatur um etwa 2 bis 3 mV/K. Im interessierenden Bereich ist diese Änderung ausreichend linear. Infolge ihrer kleinen Masse können diese Bauelemente recht gut für viele Zwecke als Thermofühler eingesetzt werden. Die relativ geringe Änderung (Grundwert für 20 °C bei Silizium z. B. etwa 0,6 V) erfordert allerdings einen Verstärker ähnlich 1.2., aber mit nicht ganz so scharfen Forderungen.

1.4. Polykristalline Halbleiter: Thermistoren

Die größte »Antwort« auf eine Temperaturänderung geben Halbleiterwiderstände der TNM-Reihe aus dem VEB Kombinat Keramische Werke Hermsdorf. Sie sind im gesamten uns interessierenden Bereich einsetzbar (unglasiert bis +150 °C; nach tiefen Temperaturen zu, z. B. −20 °C, allerdings mit schnell »unhandlich« werdenden hohen Widerstandswerten).

Richtwert im Bereich der Zimmertemperatur: etwa 3% Widerstandsabnahme gegenüber Nennwert bei 20 °C für jedes Grad Temperaturzunahme. Das ist eine erhebliche Änderung, verglichen mit den 2 bis 3 mV bei pn-Übergängen nach 1.3. An einem mit konstantem Strom gespeisten Thermistor mit 3% je Grad R-Abnahme dagegen, an dem z. B. bei 20 °C 0,6 V abfallen, mißt man bei 21 °C schon 18 mV weniger!

Der Widerstandsverlauf über der Temperatur entspricht dem einer e-Funktion. Bild 2 zeigt die Widerstands-/Temperatur-Kennlinie von zwei Heißleitern unterschiedlicher Eigenschaften im Vergleich zu einem Kupferdraht. Man verwendet Heißleiter hauptsächlich auf zwei Gebieten: zur Temperaturbestimmung im eben genannten Sinne und zur Verzögerung von Vorgängen bzw. Abfangen von Stromspitzen. Die zweite Anwendung nutzt die durch den Strom (von einem typenabhängigen

Wert an!) bedingte Eigenerwärmung des Heißleiters aus, der dadurch seinen Widerstand verringert. In der uns interessierenden Anwendung dagegen muß der »Meßstrom« bei allen erfaßten Temperaturen unter dieser kritischen Grenze bleiben. Sie liegt für die handelsüblichen TNM-Typen (Stäbchen von 10 bis 15 mm Länge und etwa 2 mm Durchmesser) bei nur 0,5 mW. Dieser Punkt muß bei der Schaltungsauslegung berücksichtigt werden. Die unvermeidliche Ansprechträgheit ist bei diesen kleinen Körpern relativ gering. Sie läßt sich aus der Erholungszeit folgern, die zwischen Erwärmung auf 150 °C (Grenzwert für unglasierte TNM-Typen) und Abkühlung auf 20 °C vergeht, bevor die Hälfte des Kaltwiderstandswerts (also R_{20}) erreicht ist. Das sind bei den genannten Typen 30 ± 10 s. Mit »Eigenheizung« betriebene Meßheißleiter können unter bestimmten Schaltungsbedingungen allerdings z. B. zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen und Flüssigkeiten eingesetzt werden, denn die Abkühlung durch die in der je Zeiteinheit am Heißleiter vorbeigeführte Menge des Gases oder der Flüssigkeit ist von dieser Menge abhängig.

Tabelle 4 informiert über die wichtigsten interessierenden Daten der Heißleiter.

Die dort angegebenen Daten gehören zu der Näherungsgleichung $R = a \cdot e^{b/T}$, worin a eine »Mengenkonstante« ist, die für die Änderung selbst nicht interessiert. Da R_{20} stets angegeben wird, kann man sie aus der angegebenen Gleichung ggf. ermitteln. Der TK des Heißleiters, α, ergibt sich aus $\alpha = -b/T^2$, ist also stark temperaturabhängig. (T ist die absolute Temperatur in K.) Man rechnet daher besser mit der vorher angegebenen Gleichung, hat aber zu bedenken, daß b selbst ebenfalls nur im Bereich von 20 bis 50 °C ermittelt wurde.

Zusammenfassend läßt sich sagen: Die große Widerstandsänderung von Heißleitern über der Temperatur wird durch stark nichtlineare Eigenschaften »erkauft«, die bei jeder Meßaufgabe zu berücksichtigen sind. Sehr wichtig ist dabei der Grenzwert der Belastbarkeit durch den Meßstrom, bis zu dem keine Eigenerwärmung auftritt. Je nach Schaltungsauslegung interessiert also der höchste Strom oder die höchste Spannung, die dem Heißleiter im Bereich der zu messenden Temperatur zugemutet werden kann. Man errechnet sie sehr einfach aus der Leistungsgleichung $P = U^2/R$ bzw. $P = I^2R$ zu $U = \sqrt{PR}$ bzw. $I = \sqrt{P/R}$. Die bei größeren Temperaturbereichen auftretende große Widerstandsänderung bringt schließlich auch noch Probleme für die Meßanordnung allgemein. Ein Spannungsteiler mit einem Verstärkereingang darf nur gering belastet werden, wenn man keine umfangreiche Korrekturrechnung anstellen will. Ändert sich aber der Teilerstrom durch einen Heißleiter z. B. um den Faktor 10, dann muß die Belastung durch den Verstärker von vornherein diesen Faktor mit berücksichtigen.

1.5. Vergleich

Für die elektronische bzw. elektrische Messung von Temperaturen stehen folgende Fühler zur Verfügung:

- Leiter (z. B. Cu-Draht), etwa lineare R-Änderung in Abhängigkeit von der Temperatur um etwa 4‰/K (positiver TK), Ausgangswiderstandsbereich begrenzt
- Thermoelemente (z. B. Cu/Konstantan), etwa lineare Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur, Größenordnung 40 µV/K, kleiner Innenwiderstand
- pn-Übergänge (z. B. b-c-Strecke eines Si-Transistors), etwa lineare Änderung mit negativem TK um etwa 2 bis 3 mV/K; Grundwert bei Silizium und Zimmertemperatur etwa 0,6 V; erforderlicher Flußstrom in der Größenordnung weniger hundert Mikroampere
- Polykristalline Halbleiter (TNM-Widerstände), exponentielle Änderung mit negativem TK (im Bereich der Zimmertemperatur etwa 2 bis 5%/K), Grenzbelastung 0,5 mW

2. Anzeigemöglichkeiten

Je nach gewünschter Information erfolgt die Anzeige von Temperaturwerten in digitaler oder analoger Weise. Im ersten Falle (Grenzwertsignalisierung, 2- oder 3-Punkt-Anzeige »oberer Grenzwert – Normalbereich – unterer Grenzwert«) zeigen Lampen oder – sparsamer und künftig sicherlich auch in verschiedenen Farben – Leuchtdioden diese Zustände eindeutig durch »Ja« (hell) oder »Nein« (dunkel) an.

Dem Vorteil der einfachen Ausgabe steht der Nachteil gegenüber, daß diese Anzeigen relativ viel Energie brauchen, also einen Verstärker benötigen. Allerdings ist das dann auch im allgemeinen nur ein Schaltverstärker – eben für die beiden Zustände »Ein bei Soll-Wert« und »Aus unterhalb bzw. oberhalb des Soll-Werts« je nach Einstellung.

Typischer Energiebedarf von Anzeigelampen: Spannungen zwischen 2 V und 12 V, Ströme zwischen 50 mA und 100 mA. Leuchtdioden benötigen dagegen nur 5 bis 20 mA bei weniger als 2 V Betriebsspannung.

Analoganzeige mit Drehspulinstrument hat den Vorteil, daß sich die Meßaufgabe bei passender Wahl des Meßwerks und der Fühlerart ohne einen Verstärker lösen läßt. Verstärkung kann zwei Gründe haben: Entweder steht nur ein weniger empfindliches Meßwerk (für den Amateur oft ein Problem!) zur Verfügung, oder der Aufnehmer hat – bezogen auf den anzuzeigenden Bereich – eine zu geringe Empfindlichkeit. Analogverstärkung bedeutet aber bei Temperaturmessung meist Verstärkung von Gleichspannungen (Gleichströmen), wenn nicht zusätzlicher Aufwand getrieben wird, z. B. wechselspannungsgespeiste Meßbrücke oder »Zerhacker«-betrieb mit dafür leichter zu beherrschendem Wechselspannungsverstärker. Typische Werte von in Frage kommenden Drehspulmeßwerken: Eigenspannungsbedarf um 100 mV, Strombedarf zwischen 30 µA und 1 mA.

3. Verstärker

Generell stellt der Meßverstärker eine Anpassung des Fühlers mit seinen festliegenden Daten an die (in gewissen Grenzen ebenfalls festliegende) Anzeige dar. Die Unvollkommenheiten eines solchen Verstärkers, vor allem seine Temperaturabhängigkeit, bleiben dabei nur in Grenzen, wenn der Betriebstemperaturbereich klein genug ist bzw. wenn der Temperaturkoeffizient der Verstärkung weit genug unter dem (gewünschten) des Fühlers liegt.

Eine besondere Stellung in der Meßtechnik nehmen Brücken ein: Das wärmeempfindliche Element wird in einen der Brückenzweige gelegt, in einem zweiten erfolgt der Abgleich; in einer Diagonalen liegt der Indikator (z. B. ein Drehspulmeßwerk), und an die zweite wird die Brückenspannung angelegt. Ihre Toleranzen dürfen wesentlich größer sein als bei einer direkten Messung, sofern nur eine Abweichung vom Brückengleichgewicht angezeigt werden soll. Brücken bringen aber ein Problem, wenn sie zur Empfindlichkeitssteigerung einen Verstärker benötigen. Das bedeutet automatisch zwei voneinander getrennte Spannungsquellen, die eine für die Brücke (bzw. – bei Wechselspannungsspeisung – den sie speisenden Generator) und die andere für den an die andere Diagonale angeschlossenen Verstärker.

4. Probleme bei der Meßwertaufnahme

Eine möglichst fehlerfreie Temperaturmessung setzt voraus, daß viele Einzelheiten beachtet werden. Das beginnt beim Meßfühler und seinem Wärmekontakt mit dem Meßobjekt. Man muß von vornherein bei der Eichung eines Temperaturfühlers wissen, ob man ihn in Flächenkontakt mit dem Meßobjekt bringen will oder ob er in dieses eindringen soll (z. B. Messung von Flüssigkeiten oder innerhalb von Bohrungen). Angesichts der Tatsache, daß zwischen Körpern unterschiedlicher Temperatur, wenn sie sich berühren, sofort ein Ausgleichvorgang beginnt, hängen die Endtemperatur des Fühlers und der Zeitpunkt, zu dem sie (etwa) erreicht wird, wesentlich vom Wärmewiderstand zwischen beiden sowie von der Wärmekapazität des Fühlers ab. Der Wärmewiderstand wird um so kleiner, je größer die Berührungsfläche und je enger der Kontakt (daher läßt sich z. B. mit Silikon- oder Heißlagerfett eine wesentliche Verbesserung erzielen). Gerät die Fühlerkapazität in die Größenordnung derer des Meßobjekts, so wird dieses zunächst spürbar abgekühlt, bis die weiterhin zugeführte Energie für

Objekt und Fühler schließlich einen neuen Gleichgewichtszustand zwischen Zufuhr und Abfuhr durch Wärmeleitung (auch über die Fühlerleitung!), Strahlung und Konvektion (Luftkühlung) eingestellt hat. (Typisches Beispiel: Messung der Gehäusetemperatur von kleinen Transistoren etwa durch einen Transistorfühler.) Für den Praktiker wird ein solches Problem kaum über eine mathematische Ableitung zu lösen sein – dazu sind meist auch zu viele Größen nicht genau genug bekannt. Man kann jedoch einen solchen Meßfall einmalig definiert einstellen und für ihn die Meßeinrichtung eichen. Mehr dazu folgt in Abschnitt 6. Weiterhin sind, wie auch an anderen Stellen dieses Bauplans erwähnt, Störspannungen zu berücksichtigen, denen man mit grundsätzlich stets verdrillten Fühlerleitungen, bifilar gewickelten Spulen und der Auslegung der Verstärker als »integrierende Verstärker« mit Kondensatorbeschaltung begegnet. Bei Gleichspannungsverstärkern sind Offsetgrößen und ihre Abhängigkeit von Temperatur und Betriebsspannung zu berücksichtigen. Worum es sich dabei handelt und wie man diese Einflüsse auf dem Wege des Abgleichs kompensieren kann, darüber wird im Abschnitt 5. berichtet.

5. Gerätebeispiele

Die im folgenden vorgestellten temperaturempfindlichen Geräte erfordern unterschiedlichen Aufwand und sind verschiedenen Zwecken angepaßt. Die Autoren hoffen, daß jeder Leser daraus wenigstens eine seinen Vorstellungen entsprechende Lösung entnehmen kann.

5.1. Einfache Fernthermometer mit Heißleiterfühler

5.1.1. Heißleiter im Grundstromkreis

Bild 3 zeigt die Prinzipschaltung des im Aufwand wohl einfachsten elektronischen Fernthermometers, das allerdings auch mit einigen Nachteilen behaftet ist (nichtlineare Skale, nur 1 Bereich bei voller Ausnutzung der Empfindlichkeit, Abhängigkeit der Anzeige von der Betriebsspannung, eingeschränkte Datenauswahl der Bauelemente durch die 0,5-mW-Bedingung bezüglich Selbstaufheizung). Dem stehen folgende Vorteile gegenüber:

- Absolutwertanzeige
- auch Temperaturen unter 0 °C meßbar
- gewünschter Vollausschlag einfach mit Widerstand einstellbar
- einfache Batteriekontrolle und Nacheichung für genauere Anzeige möglich

Bei der Dimensionierung eines solchen Thermometers, das sich prinzipiell sowohl für Außentemperaturmessungen und für Messungen im Zimmertemperaturbereich als auch für die Anzeige von Temperaturen bis maximal etwa 150 °C auslegen läßt, stößt man auf einige Freiheitsgrade, aber auch auf bestimmte Randbedingungen. Mit Parallel- und Serienwiderständen können bestimmte Skalenverläufe erzwungen werden, und mit speziellen, vorgealterten und darum recht stabilen Heißleiterfühlern hat die Industrie auch relativ genaue elektronische Thermometer entwickelt. Der Amateur dagegen muß einerseits mit den zwar preisgünstigen, aber ungealterten, weniger präzisen unglasierten TNM-Typen in den ihm gerade zugänglichen Werten und andererseits mit gerade greifbaren Instrumenten arbeiten sowie einen Kompromiß bei der Wahl der Spannungsquelle und ihres Abgleichs treffen. Es erschien daher sinnvoller, statt umfangreicher Dimensionierungsrechnungen mit ihren durch die tatsächlichen Bauelementewerte bedingten Unsicherheiten einige Angaben für praktisch interessierende Meßbereiche zusammenzutragen.

Der in Bild 3 gezeigte einfache Stromkreis ist real stets um den Instrumentenwiderstand zu ergänzen, so daß nach Bild 4 gilt: R_{HL} = Heißleiterwiderstand bei der jeweiligen Temperatur (genauen Wert am Exemplar ermitteln bzw. durch die Eichung erfassen); R_V = Vorwiderstand zu Abgleichzwecken (nur für Spezialfälle sinnvoll!); R_I = Instrumentenwiderstand (muß ermittelt werden); $R_Z = R_V + R_I$. Im Stromkreis liegt die Meßspannung $U_{meß}$, die man dem gewünschten Bereich anpassen kann. Alle Dimensionierungen müssen der Überprüfung $P_V \leqq 0{,}5$ mW für R_{HL} standhalten, was bei jeder Temperatur im Meßbereich gewährleistet sein muß. Da bekanntlich bei »Anpassung« in einem Stromkreis

mit Innen- und Außenwiderstand im Außenwiderstand die größte Leistung umgesetzt wird, besteht eine sichere Dimensionierung des Meßkreises bereits in folgender Auslegung: $P_V = \frac{U^2_{meß}}{4 R_Z} \leqq 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ in W bei U in V, R_Z in Ω. Rechnet man R_Z in kΩ, so gilt einfacher $0{,}5 \geqq \frac{U^2_{meß}}{4 R_Z}$ oder $\frac{U^2_{meß}}{R_Z} \leqq 2$. Bei gegebenem R_Z ist also die höchste mögliche Meßspannung $U_{meß} = \sqrt{2 R_Z}$ (R_Z in kΩ!).

Allerdings wird man eine Dimensionierung dieser Art möglichst vermeiden, denn die Skalenausnutzung ist um so günstiger, je kleiner R_z (also R_I) gegenüber dem Heißleiterwiderstand bei irgendeiner der zu messenden Temperaturen (also im gewünschten Meßbereich) ist. Daher geht man besser so vor: Im Amateurbedarfshandel standen z. B. bei Manuskripterarbeitung Drehspulmeßwerke der Größe 48 mm × 52 mm mit $I_V = 600\,\mu A$ und $R_I = 100\,\Omega$ sowie $I_V = 40\,\mu A$ und $R_I = 5\,k\Omega$ zur Verfügung, also mit Eigenspannungsbedarf von 60 mV bzw. 200 mV. Das TNM-Angebot ist infolge des großen Wertespektrums ebenfalls recht unterschiedlich. Niederohmige Werte gibt es (leider) häufiger als hochohmige. (Das »leider« bezieht sich auf den Strombedarf des Teilers für die Meßspannung, denn der Teilerstrom muß ja viele Male größer sein als der Meßstrom, wenn die Teilerspannung – also die Meßspannung – nicht vom Meßstrom abhängen soll!) Im Rahmen der Gültigkeit des genauen Wertes der b-Konstante (zwischen 20 °C und 50 °C) ist der – wie b mit ±20% Toleranz behaftete – »Erwartungswert« des Heißleiters bei der absoluten Temperatur T (in K) gleich $R_T = R_{20} \cdot e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293}\right)}$.

Die auftretenden Toleranzen werden durch die abschließende Skaleneichung abgefangen. Gewünscht sei ein Vollausschlag von +40 °C. Der kleinste ablesbare Temperaturwert ergibt sich dann nach Abgleich ebenfalls aus der Eichung, jedenfalls genauer als mit der Rechnung, da ja b bei z. B. −20 °C nicht mehr gilt. Das System benötigt für diese Anzeige eine bestimmte (kontrollierbare!) Meßspannung von $U_{meß} = I_V \cdot (R_Z + R_T)$, wobei im allgemeinen $R_Z = R_I$ gewählt wird. Nur für $R_T = R_Z$ wird man nun mit oben genannter Gleichung $U_{meß}$ bezüglich R_Z überprüfen. Im allgemeinen strebt man aber $R_Z \ll R_T$ an. Ohne allzu großen Fehler ist also eine 0,5-mW-Überprüfung durch $0{,}5 \geqq U^2_{meß}/R_T$ möglich mit R_T in kΩ, $U_{meß}$ in V. Für R_T ist der gewünschte Vollausschlagwert einzusetzen, errechnet aus obiger Gleichung. Beispiel einer günstigen Dimensionierung (Bild 5): Zur Verfügung standen ein TNM 68 k (b = 4500) und ein 40 μA-Meßwerk mit $R_I = R_Z = 5\,k\Omega$. Gewünschter Vollausschlag 40 °C; $R_{+40} = R_T \approx 25{,}5\,k\Omega$. $U_{meß} = 40 \cdot 10^{-6}\,A \cdot (5 \cdot 10^3 + 25{,}5 \cdot 10^3)\,\Omega = 1{,}22\,V$. Probe auf $< 0{,}5$ mW: $\sqrt{0{,}5\,mW \cdot 25{,}5\,k\Omega} = 3{,}57\,V$, also $U_{meß}$ zulässig.

Geeicht wird z. B. im Vergleich mit einem genauen Quecksilberthermometer am besten in einem isolierenden Ölbad. Bei genau 40 °C stellt man das Eichpotentiometer in Stellung Messen (!) auf Vollausschlag. Nun wird auf Eichen umgeschaltet. Die jetzt angezeigte Zeigerstellung wird Eichmarke. Sie ist zu kennzeichnen, und auf sie wird bei jeder Kontrolle der Zeiger mit dem Meßspannungspotentiometer in Stellung »Eichen« vor dem Messen eingestellt. Bei beliebigen anderen, aber selbstverständlich kleineren Temperaturen bis hin zum schmelzenden Eis (in diesem Falle im Thermogefäß; Heißleiter isolieren!) kann nun die Skale geeicht werden. Temperaturen unter 0 °C stehen im Tiefkühlfach des Kühlschranks zur Verfügung. Bei ihnen ist die Anzeige infolge des bereits recht hohen Heißleiterwiderstands ohnehin nicht mehr besonders günstig. Der mathematisch bei Nennwerten von R_{20} und b sowie $R_I = 5\,k\Omega$ zu erwartende Skalenverlauf wurde in Tabelle 5 aufgezeichnet.

5.1.2. Brückenthermometer

Mit der Schaltung nach Bild 6 läßt sich im Unterschied zur bisher nur auf Vollausschlag beziehbaren Temperatur (also der maximalen) auch eine Minimaltemperatur für den Nullpunkt des Instruments festlegen. Das geschieht durch eine Brückenschaltung: Der rechte Zweig legt die Bezugsspannung fest, im linken Zweig bewirkt der gegenüber der Bezugstemperatur (z. B. −20 °C oder −10 °C) mit zunehmender Temperatur sinkende Heißleiterwiderstand ein Ansteigen des Stromes durch das Instrument: $I_I = \Delta U / R_Z$ mit I_I Instrumentenstrom, ΔU Spannungsdifferenz bei höherer als der Bezugstemperatur, $R_Z = R_I + R_V$. Als Randbedingung ist wieder $P_V \leqq 0{,}5$ mW zu beachten, was sich bei dieser Schaltung wegen des vom (gegenüber dem Heißleiter) großen oberen Teilerwiderstand »eingeprägten« Stromes aus $P = I^2 \cdot R$ ermitteln läßt. Beispiel (s. Bild 10): TNM 100, b = 1700, Skalenanfang bei −20 °C,

$R_{-20} \approx 250\,\Omega$, also $I_{T1} \leqq 1{,}41$ mA. Für Speisung aus einem Z-Diodenstabilisierten Netzteil von z. B. 12 V setzt man mit Rücksicht auf Toleranzen einen R_{T1} von 9,1 kΩ (Standardwert) ein und bleibt damit unter dem kritischen Stromwert, nämlich bei etwa 1,3 mA. Das gibt eine Teilergrundspannung von 325 mV. Das Meßwerk entzieht nun dem rechten Teiler in dem Maße Strom und führt ihn dem linken Teiler zu, in dem die Temperatur steigt. Der Strombedarf des Meßwerks muß daher so klein wie möglich sein, wenn der mögliche Bereich voll ausgenutzt werden soll. Akzeptabel bei 1,3 mA Teilerstrom sind z. B. 40 µA. Allerdings sind bei dem vorhandenen Typ dazu 200 mV erforderlich, was den kleinstmöglichen Meßbereich bestimmt. Geht man umgekehrt von dem Wunsch aus, daß bei 40 °C Vollausschlag erreicht werden soll, so zeigt sich diese Dimensionierung als dafür geeignet. Denn: $R_{+40} \approx 69\,\Omega$, also $U_{HL} \approx 90$ mV; 325 mV − 90 mV = 235 mV, so daß über dem (einstellbaren) R_V noch 35 mV abgefangen werden können. Tabelle 6 zeigt den Rechenwert-Skalenverlauf (Fälschung durch Instrumentenstrom vernachlässigt).

Praktisch wird man den Nullpunkt z. B. im Tiefkühlfach ermitteln und bei diesem (also möglichst −20 °C) am rechten unteren Teilerwiderstand auf Skalenwert Null einstellen. Der genaue R_V zum Instrument ist dabei noch ohne Bedeutung. Danach muß zunächst auf +40 °C geeicht werden (z. B. wie bei 5.1.1.). Bei dieser Temperatur wird an R_V auf Vollausschlag eingestellt. Danach ermittelt man möglichst viele Meßpunkte der leider nichtlinearen Skale im Vergleich mit einem genauen Quecksilberthermometer, der Rest wird unter Zuhilfenahme des »tendenziellen Verlaufs« nach Tabelle 6 interpoliert.

Hinweis: Bei dieser und der Schaltung nach 5.2. wurde eine nichtrastende Taste vorgesehen, die dem Schutz des Instruments dient, denn automatische Schutzmaßnahmen gegen offenen Fühlerkreis (also hohe Spannung am Instrument) sind in diesem Zusammenhang zu aufwendig. Man schließt die Taste erst dann, wenn das Instrument nur einen geringen Ausschlag zeigt. Anderenfalls (bei nahezu Vollausschlag) ist der Fühlerkreis versehentlich unterbrochen!

5.1.3. Aufbaubeispiel

Beide Varianten erfordern relativ wenig Platz. Am aufwendigsten ist noch die nach Bild 5 wegen des Tastenschalters. Da das Instrument in jedem Falle den Hauptanteil am Frontplatten-Flächenbedarf ausmacht, können beide Varianten im gleichen Gehäusetyp untergebracht werden. Nur wer sehr klein bauen will, wird Bild 6 noch kleiner realisieren. Ein Aufbaubeispiel für Bild 5 erkennt man aus Bild 7. Daraus läßt sich leicht ablesen, welche Teilstücke aus den großen Wand- und Frontplatten von »Amateurelektronik« herauszusägen bzw. welche kleinen Platten dafür zu kombinieren sind. Bearbeitungshinweis: Größere runde Löcher, z. B. für Instrumententubus oder Tastenknöpfe, lassen sich sauber mit einem Stechzirkel in den Polystyrolfrontplatten im Sinne eines Kreisschneiders anbringen (Bild 8). Die wenigen Bauelemente der beiden Temperaturmesser sind auf einer Leiterplatte unterzubringen. Die Platte für Bild 5 (nach Bild 9) wird, zusammen mit dem Tastenschalter, seitlich von hinten oder auch in Verbindung mit der Frontplatte von vorn eingeschoben. Die Brücke des Thermometers nach Bild 6 dagegen (dimensioniertes Ausführungsbeispiel s. Bild 10) wird auf einer Leiterplatte gemäß Bild 11 im Format 20 mm × 25 mm untergebracht und paßt damit nach Bild 12 in eine Kappe der Größe 1 (»Amateurelektronik«). Die Versorgungsleitung dieser Meßeinrichtung führt zu einem 12-V-Netzteil, oder man baut das Instrument im Sinne von Abschnitt 5.4. in ein größeres Gehäuse zusammen mit einem Klingeltransformator KT 07 und einer Verdopplerschaltung ein. Wegen der begrenzten Spannung ist dann statt auf 12 V z. B. auf 10 V zu stabilisieren, wobei die Teilerwiderstände entsprechend zu verringern sind.

Übrigens: Instrumente des im Bauplan benutzten Typs haben einen nur eingerasteten Frontrahmen aus elastischem Plast, der sich leicht abheben läßt. Darunter werden zwei Löcher für die Befestigungsschrauben zugänglich.

5.2. Fernthermometer mit Fühler aus Kupferdraht

Die relativ kleine Widerstandsänderung von Kupfer mit der Temperatur legt eine Brückenschaltung ähnlich Bild 10 nahe, nur daß jetzt das Instrument wegen des positiven TK umgekehrt zu polen ist (s. Bild 13). Außerdem ergeben kleine Fühlerbauformen (das bedeutet eine erwünschte kleine Wärmekapazität und damit eine kleine Anzeigezeitkonstante) zwangsläufig niedrige Fühlerwiderstände. Ein kleiner Widerstand aber führt für brauchbare Spannungsänderungen zu großen nötigen Fühlerströmen, was wiederum Eigenerwärmung des Fühlers und damit andere als die vorausberechneten Anzeigewerte bringt. Die Spannung am Kupferfühler ergibt sich aus $U_{Cu} = I_{T1} \cdot R_{20} \cdot (0{,}004 \cdot \Delta\vartheta + 1)$. Da $R_{20} \cdot I_{T1}$ ($I_{T1} \approx$ konst.) durch die Brückenschaltung herausgehoben wird, bleibt als der Temperatur folgende Spannung $\Delta U = I_{T1} \cdot R_{20} \cdot 0{,}004 \cdot \Delta\vartheta$. Der Absolutwert der Spannungsänderung läßt sich also sowohl mit I_{T1} als auch mit R_{20} beeinflussen. R_{20} erreicht mit einigen zehn Ohm sehr schnell die Grenze des mit greifbarem Draht und tragbarer Wärmeträgheit Realisierbaren. Man muß diese Spule außerdem bifilar wickeln, anderenfalls können störende magnetische Wechselfelder aufgefangen werden. Das heißt nach Bild 14: Mit zwei Drähten gleichzeitig parallel wickeln; Anfänge als Anschlüsse benutzen und Enden verbinden.

Die erforderliche Differenzspannung und damit der Teilerstrom bei vorgegebenem Fühlerwiderstand bestimmt das vorhandene Instrument, dem möglichst nur noch ein kleiner Vorwiderstand zur Anpassung an einen glatten Skalenwert (für die Eichung wie beim Heißleiter-Brückenthermometer) zugeschaltet wird. Dabei darf das Instrument auch keinen wesentlich von 20 °C abweichenden Temperaturen ausgesetzt werden, sonst ändert sich wegen seines veränderten Spulenwiderstands die Anzeige. (Der Ausschlag eines Drehspulinstruments wird ja vom Strom bestimmt.) Im übrigen gelten die gleichen Überlegungen bezüglich des Verhältnisses von Teilerstrom zu Instrumentenstrom wie beim Heißleiter-Brückenthermometer, so daß der Vorteil der (theoretisch erreichbaren) linearen Skale des Cu-Brückenthermometers ebenfalls nur mit Meßwerken sehr kleinen Strombedarfs erreicht wird, die außerdem wegen des kleinen TK von Kupfer einen möglichst kleinen Eigenspannungsbedarf haben müssen. Der Anwendung des Prinzips ohne Meßverstärker sind daher, will man die gleichen Temperaturbereiche wie bei den vorigen Beispielen erreichen, enge Grenzen gesetzt, wozu auch die mit steigendem Teilerstrom (dem zunächst möglich erscheinenden Ausweg) schnell wachsende Eigenerwärmung des Fühlers beiträgt. Schließlich sei noch auf einen bei der Fernmessung mit niederohmigen Fühlern zu berücksichtigenden Umstand hingewiesen: auf den ohmschen Widerstand der Leitung zwischen Fühler und Meßgerät und auf dessen Temperaturabhängigkeit. Bild 15 zeigt, wie man diesen Fehlerfaktor verringern kann.

5.3. Elektronisches Thermometer für höhere Ansprüche

Das im folgenden beschriebene Gerät hat einige Merkmale, die es von den bisher besprochenen einfachen Meßeinrichtungen unterscheiden:
- monokristalliner Halbleiterfühler
- Meßwertverstärker
- Anzeigeinstrument im Gegenkopplungszweig
- mehrere Bereiche, u. a. 0 bis 25 °C bzw. 0 bis 50 °C
- einfacher, einmaliger Abgleich auf Maximum
- einmaliger Abgleich auf 0 °C
- sparsamer Batteriebetrieb über stabilisierten Transverter

Das wird durch einigen Schaltungsaufwand erkauft, wobei auch das Auslesen eines Transistorpärchens eine wichtige Rolle spielt.

5.3.1. Grundschaltung

Für den Temperaturfühler wird die Temperaturabhängigkeit der Durchlaßspannung einer in Flußrichtung mit konstantem Strom betriebenen Silizium-Halbleiterdiode ausgenutzt. Wegen des guten

Wärmekontakts zwischen Halbleiterkristall und Gehäuse eignet sich dafür besonders die Kollektor-Basis-Diode eines Transistors vom Typ SF 136 (Kollektor mit Gehäuse verbunden). Es leuchtet ein, daß der Meßstrom recht klein sein muß, damit man die Eigenerwärmung des Fühlers vernachlässigen kann. Das heißt, daß das direkte Anschalten eines Drehspulinstruments an den Fühler nicht möglich ist. Ein Verstärker mit Differenzeingang nach Art der Operationsverstärker bedeutet dagegen eine geringe Belastung des Fühlers und bringt Anpassung an das Anzeigeinstrument. Dieses Instrument (wiederum ein Drehspulmeßwerk) liegt vorteilhaft im Gegenkopplungszweig des Verstärkers und arbeitet als Strommesser. Der temperaturabhängige Kupferwiderstand des Meßwerks sowie der typbedingte Spannungsabfall am Instrument haben in dieser Schaltung keinen Einfluß auf das Meßergebnis.

Bild 16 zeigt die einfachste Schaltung des Thermometers. Sie ist nur für einen einzigen (größeren) Temperaturbereich ausgelegt. Von der vom Transverter gelieferten stabilen positiven Gleichspannung wird der Fühler über R1 mit nahezu konstantem Strom versorgt. Die temperaturabhängige Fühlerspannung steuert den nichtinvertierenden Eingang (T1) des Differenzverstärkers (T1, T2). Der invertierende Eingang (T2) wird durch den Spannungsteiler R2 und R3 (Eichung bei $I_{Instr.} = 0$) und den durch den Instrumentenstrom hervorgerufenen Spannungsabfall an R4 (Eichung bei $I_{Instr.} = max$) gesteuert. Die Differenz zwischen den beiden Eingängen gelangt über den Arbeitswiderstand R5 und den Transistor T3 auf das Instrument. Die Widerstände R6 und R7 dienen zur Stromversorgung des Differenzverstärkers bzw. des Ausgangstransistors T3.

5.3.2. Transistorauslese

Es empfiehlt sich, die Transistoren des Differenzverstärkers auf Paarigkeit hin auszusuchen. (Besser sind Doppeltransistoren, z. B. KCZ 58 von Tesla, K1NT 591 aus der SU oder ein BFY 91, wie er gelegentlich aus NSW-Importen erhältlich ist.) Bei den Transistoren ist auf gleiche Stromverstärkung und vor allem auf gleiche Basis-Emitter-Spannung zu achten. Eine Meßschaltung dazu wurde aus der Schaltung des Verstärkers abgeleitet (Bild 17). Bei geschlossenem Schalter wird der U-Offset festgestellt, bei geöffnetem ermittelt man aus der Änderung gegenüber dem Ausschlag des U-Offset den I-Offset. Dabei gilt: Differenzspannung ΔU, dividiert durch den Widerstand R, ergibt ΔI:

$\Delta I = \Delta U/R$. Unter den vorhandenen Transistoren (es können notfalls auch SC 207 e oder f sein) werden zwei ausgesucht, die die kleinsten Ausschläge bei beiden Prüfungen gezeigt haben. Bei der Prüfung Transistorfassungen benutzen, d. h., Transistoren nicht einlöten, nicht unnötig (und unterschiedlich) mit der Hand erwärmen!

5.3.3. Erweiterte Schaltung

Die Schaltung nach Bild 16 ist nur Ausgangspunkt für die folgende nach Bild 18; deren Leiterplatte schließt die einfachere (und etwas stabilere, dafür aber weniger empfindliche) Schaltung nach Bild 16 mit ein!

Bild 18 zeigt die erweiterte Schaltung des elektronischen Thermometers für höhere Ansprüche. Die wesentliche Änderung gegenüber Bild 16 liegt in der Beschaltung des Spannungsteilers R2, R3. Er ist an den in die Kollektorleitung von T3 eingefügten Widerstand R8 angeschlossen. Die dadurch erreichte Mitkopplung gestattet die Verkleinerung der Temperaturmeßbereiche ohne zusätzlichen Strom durch den Spannungsteiler. Der kleinste Temperaturbereich liegt damit bei 0 bis 25 °C für $R4 \gtrsim 0 \Omega$ und $I_{Instr.} = 50 \mu A$. Neu ist auch der Kondensator C1. Er verhindert Schwingerscheinungen und dadurch bedingte Fehlmessungen. Durch äußere Beschaltung von R4 lassen sich größere Temperaturmeßbereiche einstellen. Im Bereich von 0 bis 25 °C können durch Umpolen des Instruments Temperaturen unter 0 °C gemessen werden. Die Leistungsaufnahme dieser Schaltung einschließlich Transverter liegt bei nur 12 mW. Mit einem RZP2-Akkumulator sind also etwa 80 Stunden Dauerbetrieb möglich, mit einer Monozelle bis zu 350 Stunden.

5.3.4. Aufbaubeispiel

Der »Modul« nach Bild 18 wird nach Bild 19 zum vollständigen Gerät mit 3 Temperaturmeßbereichen und Batteriekontrolle. Dafür sind Tasten- oder Drehschalter verwendbar. Bild 20 gibt die Beschaltung eines Tastenschalters MT3 für die Bereichs- und Batterieeinschaltung sowie zur Batteriekontrolle (2 Tasten gleichzeitig drücken!) wieder, wie er im Mustergerät eingesetzt wurde. Bild 21 zeigt die in dieses Muster (Anordnung s. Bild 23) passende Leiterplatte des Meßverstärkers. Der MT3 wird von einer gleich großen Platte getragen und zusammen mit den übrigen Leiterplatten in das Gehäuse eingeschoben (Bild 22).

5.3.5. Transverter

Das Gerät enthält als einzige Spannungsquelle einen 2-V-RZP2-Akkumulator, der den im folgenden beschriebenen Transverter betreibt.

Zur Stromversorgung von integrierten Operationsverstärkern bzw. von Verstärkern mit Einzeltransistoren, die nach dem Prinzip von Operationsverstärkern arbeiten, benötigt man etwa gleich große positive und negative Spannungen. Der Transverter nach Bild 24 stellt die geforderten Spannungen zur Verfügung. Er arbeitet nach dem Prinzip des Sperrwandlers. In der Stromflußphase von T2 wird im Übertrager Ü1 magnetische Energie gespeichert, die während der Sperrzeit des Transistors über D3 in den Ladekondensator C6 übergeht. Um diesen Vorgang zu starten, fließt beim Anschalten der Batterie ein Strom über Ü1, D3 und R2. Er öffnet T3 und damit auch T1. Sobald die Spannung an C6 die Z-Spannung von D4 erreicht hat, ist T4 über den Diodenstrom leitend. Damit wird der Basisstrom von T3, T1 und T2 so weit zurückgeregelt, daß die Spannung am C6 nicht mehr weiter ansteigen kann. Die Spannung ist also stabil, und zwar sowohl gegenüber Batteriespannungsänderungen wie auch gegenüber Laständerungen. Die negative Spannung wird mit einer Spannungsverdopplerschaltung mit C3 und den Dioden D1 und D2 erzeugt und in C5 gespeichert. Sie wird außerdem über R4 für den Z-Strom von D4 herangezogen. Dieser Strom wurde dennoch äußerst gering gewählt (Einsparung von Batteriestrom!). Daher sind nur Dioden mit scharfem Z-Knick geeignet, also solche, die mit der vorgegebenen Schaltungsdimensionierung Spannungen von >6,8 V an C6 erreichen. Die neue Plast-Z-Diodenreihe SZX21/... erfüllt diese Bedingung im allgemeinen. Die Kondensatoren C1 und C4 verbessern lediglich das Schaltverhalten des Transverters. Für den Transverter wurde eine Leiterplatte nach Bild 25 entworfen, die ebenfalls in das Mustergehäuse aus Wandelementen von »Amateurelektronik« paßt (vgl. Bild 23). Bild 26 gibt weitere Einzelheiten zum Gerät wieder.

Der Fühler kann über Telefonbuchsen angeschlossen werden oder am Ende einer flexiblen Leitung fester Bestandteil des Geräts sein. Gemessen wird durch Knopfdruck zunächst auf dem größten Bereich; erst bei zu kleinem Ausschlag empfindlicher schalten!

5.3.6. Eichung

Die Eichung wird meist bei der Temperatur, die mit dem vorher genau eingestellten mechanischen Nullpunkt des Instruments übereinstimmt, mit dem Widerstand R3 durchgeführt. Im allgemeinen wählt man dafür die Temperatur des schmelzenden Eises (0 °C), jedoch sind auch andere Temperaturen möglich, z. B. kann man das Thermometer auch für den Bereich von 25 bis 75 °C eichen. Zur Eichung von 0 °C werden einige Eisstückchen aus dem Kühlschrank in eine Thermosflasche gefüllt. Der Temperaturfühler taucht in das Schmelzwasser, darf jedoch nicht am Eis anliegen. (Selbstverständlich müssen die Anschlüsse mit Epoxidharz oder Cenusil wasserdicht abgedeckt sein, damit kein Nebenschluß entsteht. Es empfiehlt sich dennoch, den Fühlertransistor nur halb einzutauchen und zu warten, bis sich die Anzeige nicht mehr ändert. Danach wird der Zeiger mit R3 auf den Nullpunkt eingestellt. Da bei dieser Eichung durch das Anzeigeinstrument kein Strom fließt und damit auch nicht über R4, wenn man von dem geringen Basisstrom von T2 absieht, braucht man die Eichung nicht zu wiederholen, gleichgültig, auf welchen Maximalwert später das Instrument eingestellt wird.

Zur Eichung des Maximalwerts ist der Vergleich mit einem genauen Thermometer (z. B. Quecksilber) erforderlich. Zwar kann man die Temperatur von 100 °C auch mit kochendem Wasser eichen, aber das gilt nur bei einem Luftdruck von 760 Torr. Wer aber hat schon ein auf Meeresspiegel geeichtes Barometer oder kennt die Höhe seines Wohnsitzes über dem Meeresspiegel, um aus den Angaben des meteorologischen Dienstes den absoluten Luftdruck zu errechnen! Deshalb erwärmt man langsam Wasser in einem Topf und taucht den Fühlertransistor in der unmittelbaren Nähe des Vergleichsthermometers wie oben in das Wasser. Bei den Temperaturbereichen bis maximal 50 °C eicht man das Instrument beim Endausschlag. Im Temperaturbereich bis 100 °C wird das Instrument bei 90 °C geeicht (denn die Skale ist ja linear). Das geschieht in jedem Falle mit R4. Zur Eichung bei genau 100 °C müßte man Öl statt Wasser verwenden.

Später beschränkt sich die Kontrolle des Geräts auf die der Batteriespannung, die bis auf 1 V absinken darf.

Das gilt für Baumuster mit Monozelle; ein RZP2-Akkumulator ist bei etwa 1,8 V Klemmenspannung »erschöpft«. Die Spannung sinkt dann schon während der Kontrolle merklich ab. Das Gerät kann allerdings auch im Sinne des im folgenden Abschnitt Beschriebenen als Netzanschlußgerät für Dauerbetrieb aufgebaut werden. Dann entfällt sogar die Batteriekontrolle!

5.4. Differenzthermometer mit integriertem Operationsverstärker

Die folgende Schaltung ist vor allem für Fortgeschrittene bestimmt. Sie setzt außerdem einen Operationsverstärker vom Typ A 109 voraus, den zu beschaffen bei Manuskriptabschluß für den Einzelamateur noch problematisch war (inzwischen wahrscheinlich z. B. beim Konsum-Elektronik-Versand Wermsdorf erhältlich). Das Gerät hat jedoch Eigenschaften, die seinen Einsatz auch für industrielle Zwecke geeignet erscheinen lassen.

5.4.1. Prinzip

Dieses Thermometer ist zur Messung von Temperaturdifferenzen zwischen Orten unterschiedlicher Temperatur, z. B. Messung der Übertemperatur an Netztransformatoren, Halbleiterbauelementen, Widerständen usw., vorgesehen. Bei bekannter Bezugstemperatur, z. B. der Temperatur des schmelzenden Eises oder der zusätzlich mit einem Thermometer gemessenen Raumtemperatur, kann aber auch die tatsächliche Temperatur des Meßorts ermittelt werden. Die erforderliche Addition von Raumtemperatur und Temperaturdifferenz läßt sich dabei sogar elektronisch durchführen, so daß die Temperaturwerte wieder direkt abgelesen werden können!

Das Differenzthermometer nutzt die thermoelektrische Spannung zwischen Metallverbindungen unterschiedlicher Temperatur aus. Diese Spannung ist sehr klein (zwischen 2 Schweiß- bzw. Lötstellen einer Kupfer-Konstantan-Verbindung liegen etwa 40 μV/K). Sie wird deshalb mit einem Operationsverstärker vom Typ A 109 auf den zur Instrumentenanzeige erforderlichen Wert verstärkt. Operationsverstärker haben sehr hohe Verstärkungsfaktoren. Ihre beiden gegen Masse symmetrischen Betriebsspannungen müssen stabilisiert werden. Zusätzlich ist bei gedrückter Taste »Eichen Offset« mit R13 der Abgleich der Offsetspannung (Eingangsspannungsdifferenz) des Operationsverstärkers und damit der Nullabgleich am Instrument durchzuführen. Bild 27 zeigt die Prinzipschaltung des Differenzthermometers. Ohne Eingangsspannung (beide Metallverbindungen des Thermoelements auf gleicher Temperatur bzw. Taste »Eichen Offset« gedrückt) zeigt das Instrument einen positiven oder negativen Ausschlag, der von der Offsetspannung des Operationsverstärkers bestimmt wird. Sie läßt sich durch eine mit R13 einstellbare und über R6 und R7 geteilte Spannung kompensieren, die an den positiven Eingang des Verstärkers gelegt wird. Damit bleibt der Offsetabgleich nahezu unabhängig von der mit R1′ eingestellten Empfindlichkeit, und der negative Eingang (die virtuelle Masse des Verstärkers) wird auf 0,0...V gelegt.

Gelangt jetzt durch Erwärmen der einen Metallverbindung eine Spannung U_e an R1′, so muß der durch R1′ fließende Strom durch einen vom Ausgang her über R9 fließenden Strom entgegengesetzter Polarität ausgeglichen werden, und die virtuelle Masse des Verstärkers bleibt auf 0,0...V. Bei genügend großer Verstärkung – das ist bei Verwendung eines Operationsverstärkers gegeben – stellt sich der

Strom durch R9 automatisch richtig ein und bringt, da er gleichzeitig durch das Instrument fließt, die Anzeige der Eingangsspannung, die ein Maß für die Temperaturabweichung ist. Die Empfindlichkeit der Anzeige ändert sich bei gegebener Empfindlichkeit des Strommessers mit dem Abgleich von R1′ und mit dem Ableitstrom über den Widerstand R11, der bei Bedarf hinzugesetzt werden kann. Es ist:

$$R1' = \frac{U_e}{I_a}\left(\frac{R9}{R11} + 1\right) - R_F \text{ bzw. für } R11 \rightarrow \infty \; R1' = (U_e/I_a) - R_F$$

R_F Fühlerwiderstand (Gesamtwiderstand des Thermoelements)

Die Genauigkeit der Anzeige ist nun bei gegebener Eingangsspannung U_e nur noch von der Konstanz der Werte R1′ und des Fühlerwiderstands R_F sowie vom Anzeigewinkel des Meßwerts bei eingeprägtem Strom I_a abhängig. Der Kupferwiderstand des Instruments geht dagegen nicht in das Meßergebnis ein. Die Grenzempfindlichkeit ($R1' \rightarrow 0$) bestimmen der Fühlerwiderstand und die Empfindlichkeit des Strommessers: $U_e = I_a \cdot R_F$. Reicht diese Empfindlichkeit für den vorgegebenen Zweck nicht aus, so muß R11 eingesetzt werden, wobei die Genauigkeit der Anzeige nun zusätzlich noch von der Konstanz der Widerstände R11 und R9 abhängig ist. Man erkennt: Der (im Vergleich zur Meßspannung) in der Größenordnung einiger zehn Mikrovolt bei kleiner Temperaturdifferenz relativ große Spannungsbedarf des Instruments (Größenordnung 100 mV) wird über den Verstärker gedeckt. Der Eingangsstrom ist dagegen gleich dem Ausgangsstrom (bei fehlendem R11) und damit relativ klein.

5.4.2. Vollständige Schaltung

Bild 28 zeigt die vollständige Schaltung des Differenzthermometers (noch ohne Netzteil). Der Widerstand R1′ des Prinzipschaltbilds wurde zur besseren Einstellbarkeit und zur besseren Konstanz des Empfindlichkeitsabgleichs aus den Widerständen R1, R2 und R3 (dem Abgleichwiderstand) gebildet. Diese Widerstände werden so ausgelegt, daß man mit R3 die Anzeige um etwa ±3% bis ±10% ändern kann. Zunächst sei der Fühlerwiderstand R_F bekannt. Durch Rechnung und Kontrollmessung läßt sich R1′ bestimmen. Mit dem Verhältnis $R1'/R_F$ ergeben sich aus der Tabelle 7 Richtwerte für die Bestimmung der Widerstände R1 bis R3 bei einer einstellbaren Anzeigeänderung von ±10%. Die Widerstände R9, R10 (und R11) begrenzen gleichzeitig den Instrumentenstrom bei Überschreitung des Meßbereichs. Die maximale Ausgangsspannung ($U_{a\,max}$) des Verstärkers beträgt etwa ±6 V bei einer Speisespannung von $U_B = \pm 9$ V. Der Widerstand R9 ergibt sich aus $R9 = \frac{U_{a\,max}}{I_a}\left(1 + \frac{R9}{R11}\right) - R10$. Der Widerstand R10 hat nur Schutzfunktion für den Operationsverstärker.

Fehlmessungen durch Störspannungen, die über den Fühler in den Verstärker gelangen, werden durch zwei Kondensatoren unterdrückt: C1 überbrückt die Verstärkereingänge für hochfrequente Störungen, und C3 verringert die Verstärkung für niederfrequente Störspannungen einschließlich Netzbrumm (Tiefpaßverhalten). Die Stromversorgung für den Offsetabgleich erfolgt über die Widerstände R12 und R14 mit den Dioden D1 und D2. Sie kompensieren die Temperaturabhängigkeit der Offsetspannung. Der Abgleich selbst erfolgt bei gedrückter Taste Ta1 mit dem Widerstand R13 auf Ausschlag 0 durch Einspeisung über R6 in den positiven Verstärkereingang. An Stelle des Fühlerwiderstands wird dabei ein etwa gleich großer Widerstand R4 eingeschaltet. Er erleichtert den Abgleich, weil die Verstärkung des Verstärkers dann gleich bleibt, insbesondere bei kleinem Verhältnis $R1'/R_F$. Außerdem schaltet Taste Ta1 die mit R15 veränderbare Verschiebespannung ab. Nach erfolgtem Offsetabgleich läßt sich durch Taste Ta2 (Taste Ta1 bleibt gedrückt) diese Spannung wieder zuschalten. Sie bewirkt (über R5) eine Verschiebung des Anzeigewerts in dem Skalenbereich. Damit kann man den Instrumentenzeiger z. B. auf die mit einem Thermometer gemessene Raumtemperatur einstellen. Sofern die »Kaltseite« des Thermoelements die gleiche Temperatur angenommen hat und während der Messungen beibehält, lassen sich mit der »Warmseite« die zu messenden Temperaturwerte direkt ablesen. Der Skalenbereich umfaßt die Werte von 0 °C bis zu dem mit R3 geeichten Maximalwert.

Zur einwandfreien Funktion des Verstärkers sind noch weitere Bauelemente erforderlich. Die

Kondensatoren C2 und C4 sowie der Widerstand R8 bilden die externe Frequenzgangkorrektur; sie beseitigen die Schwingneigung des Verstärkers.

5.4.3. Inbetriebnahme und Eichung

Die Leiterplatte wird bis auf R1, R2, R3 und R6 bestückt und insbesondere auf Kurzschlüsse und Lötbrücken kontrolliert. An Stelle von R1 ist ein Trimmpotentiometer (z. B. 250 Ω) provisorisch eingelötet und auf Mitte gestellt. Als R6 wird – ebenso provisorisch – ein Widerstand von z. B. 47 kΩ eingesetzt. Außerdem schließt man die Bedienplatte an. Nach Anlegen der Betriebsspannung Taste Ta1 drücken und mit R13 Anzeigeinstrument auf Null stellen (vorherige mechanische Nullkorrektur vorausgesetzt). Läßt sich die Einstellung mit R13 nicht durchführen, so ist R6 zu verkleinern. Steht R13 im Mittelbereich, dann wird R6 vergrößert (leichtere Einstellbarkeit). Tasten Ta1 und Ta2 drücken: Mit R15 ist der Zeiger zu verschieben (nach fertigem Abgleich um etwa 45 K). Wird ein größerer Bereich gewünscht, so kann man R5 verkleinern.

Eichung des Bereichs
Die Kaltseite des Thermoelements wird auf die Temperatur des schmelzenden Eises gebracht, und die Warmseite kommt zusammen mit einem Thermometer in eine erwärmte Flüssigkeit (s. auch unter 5.3.6.). Mit dem Trimmpotentiometer ist jetzt der Ausschlag am Instrument auf die Thermometeranzeige zu bringen (möglichst in der Nähe des Vollausschlags eichen). Danach Potentiometer auslöten, Widerstand messen (dies ist R1') und Verhältnis $R1'/R_F$ ausrechnen. Aus Tabelle 7 Richtwerte ablesen, R1 bis R3 überschlägig ausrechnen und einsetzen. Kontrolle des Stellbereichs und abschließendes Eichen des Differenzthermometers mit R3 schließen sich an.

Veränderung des Meßbereichs
Der Meßbereich des so geeichten Geräts kann durch Zuschalten eines Widerstands an Stelle von (oder parallel zu) R11 verkleinert werden. Zur Erweiterung ist ein Widerstand vom positiven Instrumentenanschluß zum negativen Verstärkereingang zu schalten. Beachte: Für Meßwerte über 200 °C muß die Warmseite des Thermoelements geschweißt bzw. hart gelötet sein.

5.4.4. Berechnungsbeispiel

Gegeben: Instrument $I = 100\,\mu A$ (entspricht I_a)
$Ri = 1000\,\Omega$
Fühler $R_F = 21\,\Omega$ $U_F = 40\,\mu V/K$ Temperaturbereich $\Delta\vartheta = 100\,K$
Bestimmung der Widerstände:

$$R_1' = \frac{U_e}{I_a} - R_F \qquad U_e = U_F \cdot \Delta\vartheta$$

$$R_1' = \frac{40\,\mu V \cdot 100\,K}{K \cdot 100\,\mu A} - 21\,\Omega = 40\,\Omega - 21\,\Omega = 19\,\Omega$$

$$\frac{R_1'}{R_F} = \frac{19\,\Omega}{21\,\Omega} = 0{,}9 \text{ (nächstgrößerer Wert: 1).}$$

Aus der Tabelle entnimmt man:
$R1 = 1{,}32 \cdot 21\,\Omega \approx 27\,\Omega$
$R2 = 2{,}03 \cdot 21\,\Omega \approx 43\,\Omega$
$R3 = 12{,}4 \cdot 21\,\Omega \approx 250\,\Omega$

$$R9 = \frac{U_{a\,max}}{I_a} - R10$$

$$R9 = \frac{6\,V}{0{,}1 \cdot 10^{-3}\,A} - 470\,\Omega = 60\,k\Omega - 0{,}47\,k\Omega \text{ (gewählt: } 56\,k\Omega)$$

$R4 = R_F = 21\,\Omega \rightarrow 22\,\Omega$

Bereichsveränderung:

a) auf 200 K: $F_E = \frac{200\,K}{100\,K} = 2$

$$R_Z = \frac{R9 + Ri}{F_E - 1} \qquad R_Z = \frac{56\,k\Omega + 1\,k\Omega}{2 - 1} = 56\,k\Omega + 1\,k\Omega$$

b) auf 50 K: $F_v = \frac{50\,K}{100\,K} = 0{,}5$

$$R11 = R9\left(\frac{1}{F_v} - 1\right) \qquad R11 = 56\,k\Omega\left(\frac{1}{0{,}5} - 1\right) = 56\,k\Omega$$

5.4.5. Aufbaubeispiel

Das Gerät wird am besten aus einem Netzteil gespeist. Die Ausführung eines Netzanschlusses erfordert Sachkenntnis und muß daher dem entsprechend vorgebildeten Fortgeschrittenen vorbehalten bleiben. Für ihn gelten die folgenden Hinweise. Alle anderen müssen ihre Kleinspannung aus einem gekapselten Schutztransformator beziehen. Steht dafür ein Eisenbahn-Zubehörtransformator zur Verfügung, so entfallen in Bild 29, dem Stromlaufplan des Netzteils, C1, C11 und D1, D11. D12 wird dann direkt mit D2 verbunden. R1 und R11 (sowie die Spannungen von C2, C12) sind der höheren Transformatorspannung anzupassen. (D2 und D12 vertragen nur etwa 250 mW!)

Ein fachgerecht aus dem Gehäuse entfernter und ebenso umsichtig neu montierter und angeschlossener Klingeltransformator vom Typ KT 07 (der ja überdies auch Kurzschlüsse verträgt) eignet sich auf Grund seiner 2-Schenkel-Wicklung und der Kunststoff-Wickelkörper gut für Geräte ohne Schutzkontaktanschluß. Wichtigste Regel: Netzleitung so anschließen, daß selbst im Fehlerfall kein Netzspannung führender loser Draht an den berührbaren Sekundärkreis geraten kann! Zusätzlich sollte man die Drahtdurchführungsöffnungen in der Primärspule noch mit Cenusil schließen. Einzelheiten zur Montage gehen aus Bild 32 hervor. Als Gehäuse wurde ein großes »Grundgehäuse« von »Amateurelektronik« vorgesehen, in der Tiefe längs der gegebenen Sägelinien auf 55 mm Innenmaß gekürzt. Die Leiterplatten sind darum 55 mm lang und 58,5 mm hoch. (Wen diese dem Einschieben entgegenkommende Maßabweichung vom Standard stört, der kann auf Rastermaß 57,5 kürzen und dafür einseitig eine Gleitrippe mit 1 mm Nuthöhe – ebenfalls von »Amateurelektronik« – einsetzen.) Bild 30 gibt alle nötigen Informationen zur Verstärkerplatte. Die Bedienplatte mit den beiden Tasten und dem Verschiebepotentiometer (R15) wird gemäß Bild 31 angefertigt. Die Netzteilplatte, die flächenbedingt nur mit den halben Verdopplerschaltungen bestückt ist – der Rest befindet sich auf der Verstärkerplatte einschließlich der Z-Dioden! –, geht aus Bild 32 hervor. Dieses Bild zeigt außerdem die Montage des Netztransformators, dessen Eingang an einer Lüsterklemmenleiste liegt. Beide (Leiste und Transformator) sind an einer neutralen 1,5-mm-Hartpapierplatte festgeschraubt, die unmittelbar an der Innenseite der Seitenwand zwischen dieser und den dort endenden Rippen von Deck- und Bodenplatte eingeschoben wird. Bild 33 zeigt Einzelheiten des Gesamtaufbaus.

6. Sonstige Anwendungen

6.1. Allgemeines

Der Einsatzbereich elektronischer Thermometer ist groß. Einige Anwendungen wurden bereits im Zusammenhang mit den Gerätebeschreibungen im Abschnitt 5. genannt. Neben der selbstverständlichen Möglichkeit, die Temperatur des Zimmers selbst, in dem sich das Gerät befindet, zu kontrollie-

Tabelle 1
Lineare Ausdehnungskoeffizienten (aus: Recknagel, Lehrbuch der Physik, Schwingungen und Wellen, Wärmelehre, VEB Verlag Technik, Berlin 1958, S. 318)

Metall	$10^6\,\alpha$/K
Aluminium	23
Blei	29
Flußstahl	11
Kupfer	14
Platin	9
Silber	20
Messing	18

Tabelle 2
Widerstand je Meter Drahtlänge für Kupferdrähte

Cu-Draht ⌀ mm	R je m Ω
0,05	8,95
0,06	6,18
0,07	4,55
0,08	3,50
0,09	2,75
0,10	2,23
0,12	1,55
0,14	1,14
0,16	0,87
0,18	0,68
0,20	0,56
0,22	0,46
0,25	0,36
0,30	0,25
0,35	0,18
0,40	0,14
0,45	0,11
0,50	0,09
0,60	0,06

Tabelle 3
Auf Platin bezogene thermoelektrische Spannungsreihe für den Bereich von 0 bis 100 °C (aus: Hofmann/Gatzmanga, Einführung in die Betriebsmeßtechnik, VEB Verlag Technik, Berlin 1972, S. 207)

Metall	Thermo-spannung mV
Konstantan	− 3,4
Nickel	− 1,5
Palladium	− 0,6
Platin	0,0
Aluminium	+ 0,4
Platin-Rhodium	+ 0,64
Manganin	+ 0,72
Silber	+ 0,72
Gold	+ 0,75
Kupfer	+ 0,76
Wolfram	+ 0,81
Eisen	+ 1,80
Nickel-Chrom	+ 2,20
Silizium	+44,80

Tabelle 4
Daten gebräuchlicher TNM-Heißleiterwiderstände (Auswahl). Bis 5,6 kΩ 10 mm Länge, darüber 15 mm

R_{20} (±20%) Ω	b (±10%) K	TK_{R20} (±10%) −%/K
47	1500	1,7
100	1700	2,0
150	1800	2,1
220	1900	2,2
480	2200	2,6
680	2400	2,8
1 k	2600	3,0
2,2 k	3000	3,5
4,7 k	3250	3,8
6,8 k	3400	4,0
10 k	3600	4,2
12 k	3700	4,3
15 k	3800	4,4
22 k	3950	4,6
33 k	4100	4,8
47 k	4300	5,0
68 k	4500	5,2
100 k	4800	5,6
150 k	5000	5,8
470 k	5560	6,4
1 M	5700	6,7

Tabelle 5
Skalenverlauf eines einfachen Thermometers nach Bild 5 mit Heißleiterfühler (Annahmen: R_{20} = 68 kΩ, b = 4500, R_Z = 5 kΩ, Vollausschlag 40 °C)

ϑ °C	α/α_{max} %
+40	100
+35	82
+30	66
+25	53
+23	48
+20	42
+18	37,8
+15	32,5
+12	27,8
+10	25
+ 8	22
+ 5	19
0	14,2
− 5	10,5
−10	7,7
−15	5,5
−20	3,9

Tabelle 6
Skalenverlauf des Brückenthermometers nach Bild 5 bzw. Bild 10 (Annahmen: R_{20} = 100 Ω, eingestellter I_T = 1,22 mA; gewünschter Bereich −20 bis +40 °C)

ϑ °C	α/α_{max} %
+40	100
+35	96,5
+30	92,5
+25	88
+20	83
+15	77
+10	70
+ 5	62,5
0	53,6
− 5	43
− 8	36
−12	25,6
−15	16,7
−18	7
−20	0

ren, bieten sich unter Beachtung der Hinweise zum Leitungsproblem Einsatzmöglichkeiten, die im Wohnbereich z. B. die Kontrolle von Keller, Kinderzimmer, Garten und Wasseranschluß (Frostgefahr!) einschließen. Bei Einsatz an Stellen, wo Sonneneinstrahlung möglich ist, muß der Fühler selbstverständlich abgeschattet sein, denn die Aufheizung durch Sonneneinstrahlung ergibt ja, wie schon eingangs erwähnt, gegenüber der meist interessierenden Lufttemperatur völlig falsche Werte. Temperaturfühler können aber auch eingegraben werden und melden dann z. B. Bodenfrost. Besonders in solchen Fällen, wo Feuchte zur Korrosion und zu Fehlmessungen durch Parallelwiderstände führen kann, ist eine sorgfältige, wenn auch aus Gründen der Wärmeleitung nicht zu dicke Isolation von Fühler und Anschlußstellen erforderlich. Wie schon erwähnt, kommen dafür Cenusil, EP 11 oder auch – besonders bei PVC-isolierter Anschlußleitung – ein mehrfach getauchter PVC-Kleber-Überzug (PCD 13, PC 15 o. ä.) in Frage. Bei Temperaturen um 100 °C ist nur Cenusil genügend wärmebeständig.

6.2. Messungen an Halbleiterbauelementen

Für den Amateur ist die Kontrolle der Verlustleistung von Halbleiterbauelementen bezüglich der zulässigen Höchsttemperatur von Bedeutung. Während bei Kleinleistungstransistoren nur der Flächenkontakt des Fühlers (nach 5.3. oder 5.4.) in Betracht kommt, den man an einem Transistor der jeweiligen Bauform bei definiert zugeführter Verlustleistung einmalig eichen sollte, empfiehlt sich für den Erfahrenen bei Leistungstransistoren im Rahmen von Entwicklungsuntersuchungen Anbohren (!) der Gehäusegrundplatte eines Testmusters bis unter den Kristall. Das ist aber nur dem zu empfehlen, der sowohl den Innenaufbau des betreffenden Transistors kennt als auch präzise genug zu arbeiten vermag. Selbstverständlich darf man keinesfalls dabei den Kristall erreichen! Bild 34 gibt eine Empfehlung für die KU-Typenreihe. Mit einem in diese Bohrung eingeschobenen Thermoelement nach 5.4., mit Silikonfett oder Heißlagerfett zum besseren Wärmekontakt versehen, erhält man Meßwerte, die nur wenig unter der tatsächlichen Kristalltemperatur liegen. Am Rand zwischen Gehäuse und Bodenplatte dagegen ist stets noch der Wärmewiderstand R_{thi} sowie ein zusätzlicher Wert wegen des Übergangs zum Thermoelement zu berücksichtigen. Außerdem führt in jedem Falle die Zuleitung einen Teil der aufgenommenen Wärme ab.

6.3. Zuglochdetektor

Jedes im Zimmertemperaturbereich genügend empfindliche (also genügend »auflösende«) elektronische Thermometer mit einem Fühler möglichst kleiner Wärmekapazität ist für diese etwas ungewöhnliche Anwendung geeignet, nämlich zur Kontrolle der Abdichtungen von Türen und Fenstern in der kalten Jahreszeit. Eine offene Stelle in der Abdichtung bewirkt durch die einströmende Kaltluft einen deutlichen Rückgang des Ausschlags am Instrument, wenn der Fühler zu dieser Stelle gelangt. Kerzen oder gar Streichhölzer kann man für diesen Fall also ruhig »vergessen«!

6.4. Einweckhilfe

In Bratröhren kann man durchaus ohne zusätzliches Wasserbad einwecken. Daß die erforderliche Temperatur erreicht ist, vermag ein Thermofühler nach 5.2., 5.3. oder 5.4. anzuzeigen. Den Rest übernimmt ein Kurzzeitwecker. (Das Ganze läßt sich zu einem System verknüpfen.) Man beachte, daß der Wärmekontakt zum Einweckgut so eng wie möglich ist. Innerhalb der Höhe der Füllung des Weckglases wird dazu z. B. ein entsprechend breiter Aluminiumstreifen mit Gummiband am Glas befestigt. Zwischen Blech und Glas befindet sich der Fühler.

Einstellung z. B. für Obst: etwa 90 °C (Erfahrungswert), Einweckzeit 30 Minuten.

6.5. Elektronischer Pfeifkessel

Ein mit Cenusil umhüllter Fühler aus einem Heißleiter oder auch eine Kupferdrahtspule mit gut isolierten Anschlüssen kann ohne hygienische Bedenken (nach einmaligem Säubern) in jeden Wassertopf gehängt werden, ja sogar als Melder für das beginnende Kochen des Kartoffeltopfs fungieren. Je nach Wahl der Schaltung ergibt sich entweder lediglich ein optisches Signal auf dem Anzeigeinstrument oder (im Falle des entsprechend eingestellten Grenzwertmelders) auch ein vom Schwellwertschalter ausgelöstes akustisches Signal. Schließlich kann auch dieses Signal wieder einen Langzeitschalter starten, der z. B. das Garwerden der Kartoffeln anzeigt (oder – kürzer – das Signal für die fertig gekochten Eier liefert).

7. Schlußbemerkungen

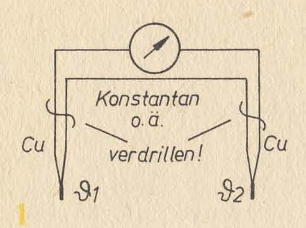
Jede Messung der beschriebenen Art stellt eine Informationsausgabe an den Menschen dar. Er reagiert darauf je nach Bedarf. Führt man die Information eines Temperaturfühlers einer Auswerteschaltung zu, die bei Über- oder Unterschreiten der Temperaturen dafür sorgt, daß durch Wärmezufuhr oder -abfuhr nach Möglichkeit der gewünschte Temperaturbereich beibehalten wird (Thermostat!), so entsteht ein Regelkreis. Solche Regelungen waren nicht das Thema unseres Bauplans, doch können die beschriebenen Schaltungen durchaus auch für solche Aufgaben mit herangezogen werden. Unser Ziel war es vielmehr, mit den Mitteln der Elektronik die Temperatur entfernter Räume, des Bodens, von Flüssigkeiten, geschlossenen Behältern oder kleinen Gegenständen anzuzeigen. Diese Aufgabenstellung dürfte der vorliegende Bauplan erfüllt haben, mit unterschiedlichem Aufwand für unterschiedliche Zwecke.

Tabelle 7

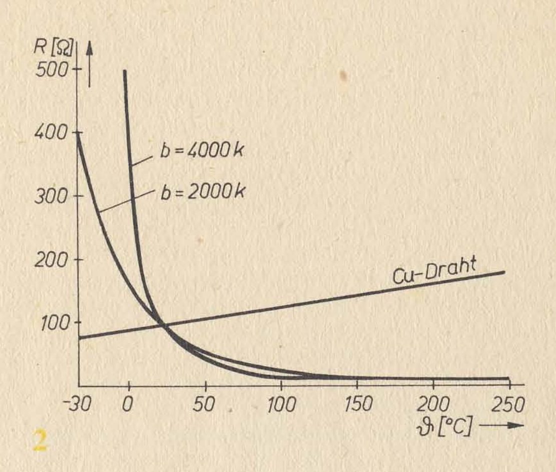
Richtwerte für die Bestimmung von R1 bis R3 bei einer einstellbaren Anzeigeänderung von 10 %.
Zeile a: $R1/R_F$; $R1 = b \cdot R_F$, $R2 = c \cdot R_F$, $R3 = d \cdot R_F$

a	0,25	0,35	0,5	0,7	1,0	1,4	2,0	2,8	4,0	6,3	8,0	11,0	16,0
b	0,413	0,534	0,72	0,96	1,32	1,80	2,53	3,50	4,95	7,73	9,79	13,4	19,5
c	0,19	0,374	0,682	1,18	2,03	3,26	5,18	7,84	11,9	19,9	25,8	36,4	53,6
d	4,05	5,17	6,80	9,04	12,4	16,9	23,6	32,6	46,0	71,8	90,8	124	180

1. Auflage, 1.–25. Tausend · © Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) – Berlin, 1977 · Cheflektorat Militärliteratur · Lizenz-Nr. 5 · LSV: 3539 · Lektor: Rainer Erlekampf · Zeichnungen: Manfred Schulz Typografie: Helmut Herrmann · Hersteller: Hannelore Lorenz · Vorauskorrektor: Ingeborg Kern · Korrektor: Johanna Pulpit · Printed in the German Democratic Republic · Lichtsatz: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97 · Druck und Buchbinderei: Sachsendruck Plauen · Redaktionsschluß: 25. September 1976 · Bestellnummer: 745 860 9

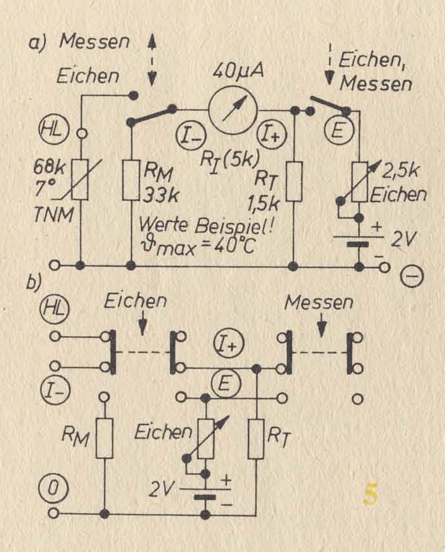


1

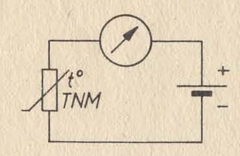


2

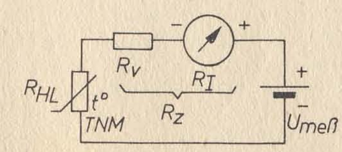
Bild 1
Meßkreis für Temperaturdifferenz mit Thermoelementen: ϑ_1 zu messende Temperatur, ϑ_2 Vergleichstemperatur
Bild 2
Temperaturabhängigkeit von Kupferdraht gegenüber zwei Heißleiter-Widerständen mit unterschiedlich großer b-Konstante
Bild 3
Einfachster Meßkreis mit temperaturabhängigem Widerstand. Ausschlag ist stets größer als Null!
Bild 4
Reale Verhältnisse im Meßkreis nach Bild 3. Die »Scherung« des temperaturabhängigen Widerstands durch Instrumenten- und Vorwiderstand verschlechtert die Auflösung



5

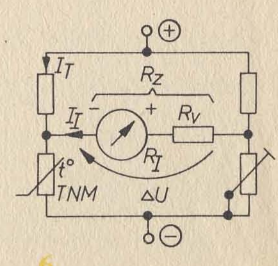


3

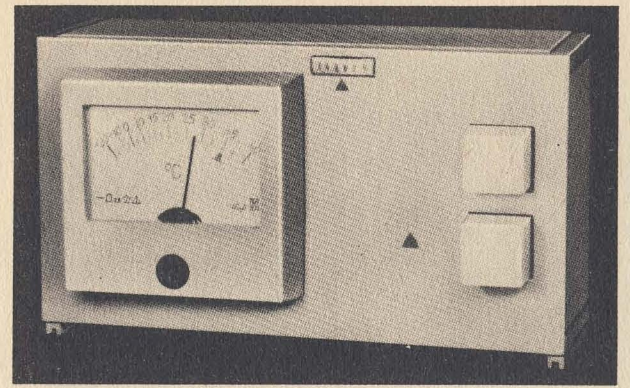
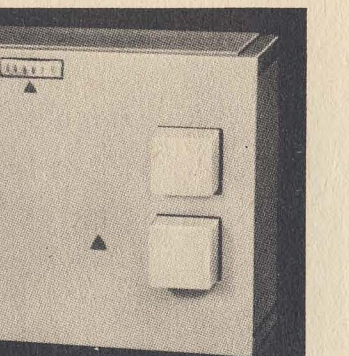


4

Bild 5
a – Heißleiterthermometer nach Bild 4 mit Eichmöglichkeit zur Verringerung der Meßunsicherheit; dimensioniertes Beispiel;
b – Tastenschalterverdrahtung (0 ist Minus)
zu a
Bild 6
Brückenthermometer mit Heißleiterfühler und einstellbarer Minimaltemperatur

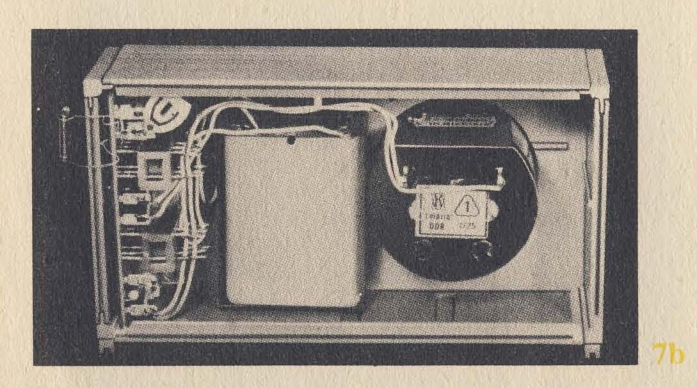


6

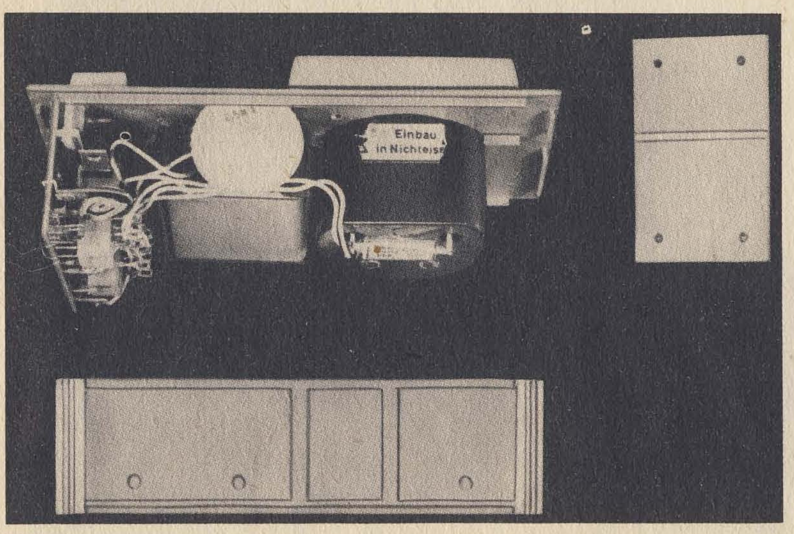



7a

Bild 7
Ausführungsbeispiel zu Bild 5
Bild 8
Stechzirkel als »Kreisschneider«
Bild 9
Leiterplatte für Thermometer nach Bild 5 mit Tastenschalter für Messen und Eichen: a – Leiterbild, b – Bestückungsplan
Bild 10
Ausführungsbeispiel zu Bild 6: $R_{20} = 100\,\Omega$, $\vartheta_{meßl} \approx -20\,°C$, daraus $I_T = 1{,}41$ mA (gewählter Wert lt. Text von U_{stab} und R_{T1} abhängig!), Meßwerk $40\,\mu A/200\,mV$, $\vartheta_{max} = +40\,°C$

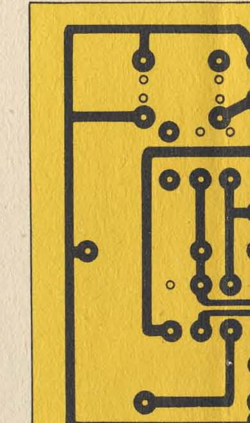


7b





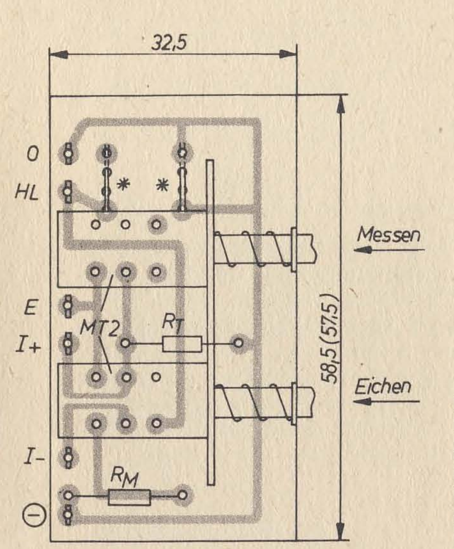
7c




9a

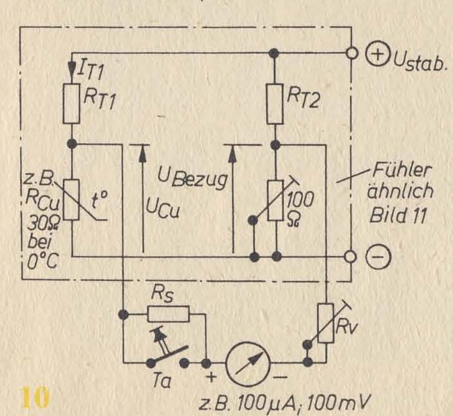
8

drücken
drehen
(unten halten)



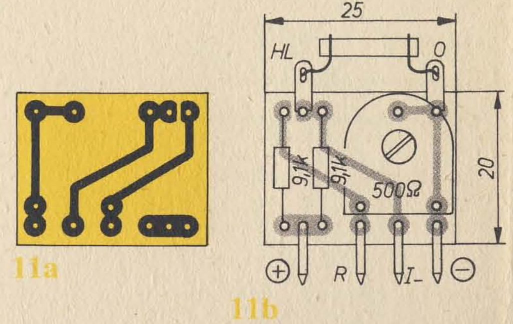
*) Federn von „Amateurelektronik" für 1mm-Stecker (HL-Anschluß), wahlweise
Stecklötöse
Bohrungen ϕ1, für Schalter und Kontaktfedern ϕ1,3

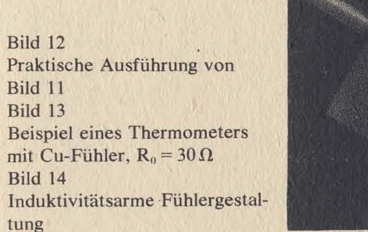
9b



10

Bild 11
Meßfühler zu Bild 10: a – Leiterbild, b – Bestückungsplan (in »Kappe 1« von »Amateurelektronik« stecken; stirnseitig Bohrungen für die Stecklötösen; dort außen Heißleiter anlöten!)

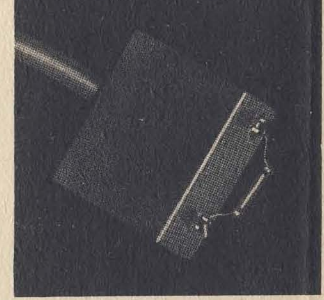




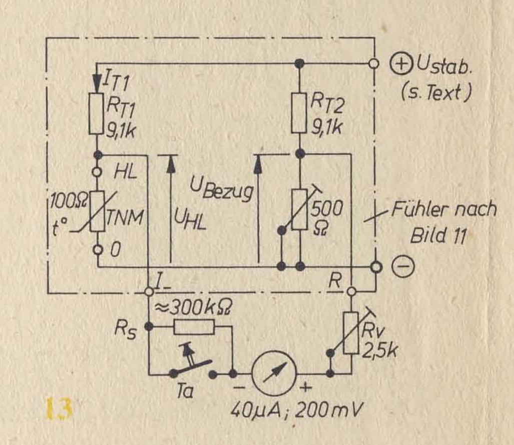
11a

11b

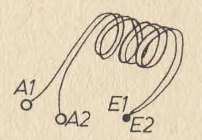
Bild 12
Praktische Ausführung von Bild 11
Bild 13
Beispiel eines Thermometers mit Cu-Fühler, $R_0 = 30\,\Omega$
Bild 14
Induktivitätsarme Fühlergestaltung



12

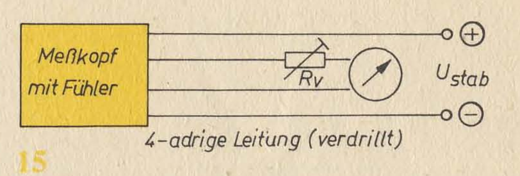


13

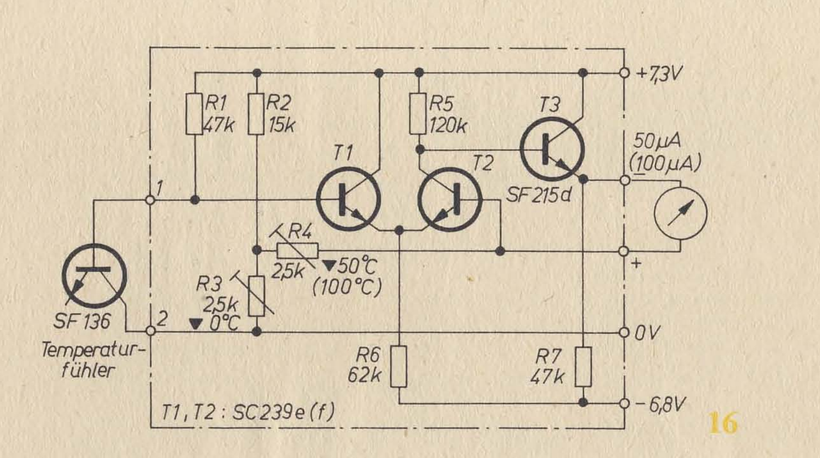


14

Bild 15
Weitgehendes Ausklammern der Zuleitung aus dem Meßergebnis



15

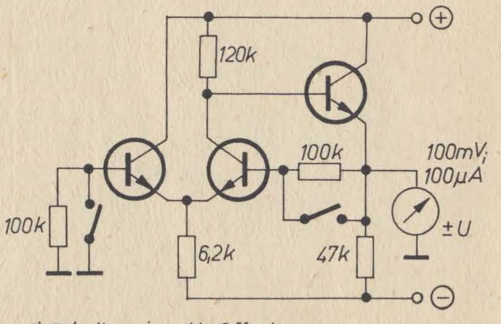


16

Bild 16
Grundschaltung für Thermometer mit Differenzverstärker (Speisung aus Transverter nach Bild 24)



Bild 17
Meßschaltung zur Transistorauslese für Bild 16 bzw. Bild 18 (Speisung aus Transverter nach Bild 24)



1) Schalter ein: U-Offset
2) Schalter aus: Änderung zu 1)
≙ I-Offset
$\Delta I = \frac{\Delta U}{100k}$

17

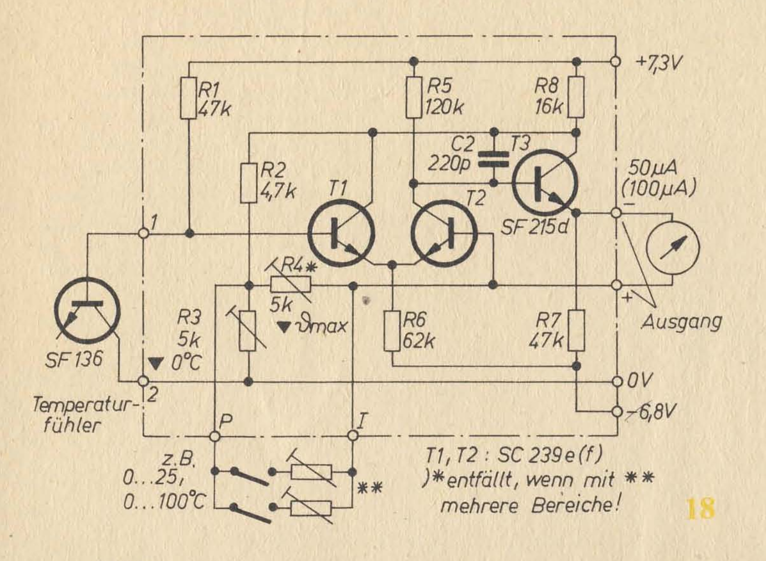


Bild 18
Erweiterte Schaltung des elektronischen Thermometers mit Differenzverstärker und Diodenfühler

Bild 19
Vollständige Schaltung zu Bild 18 mit Schalter für 3 Meßbereiche und Batteriekontrolle (Speisung aus Transverter nach Bild 24!)

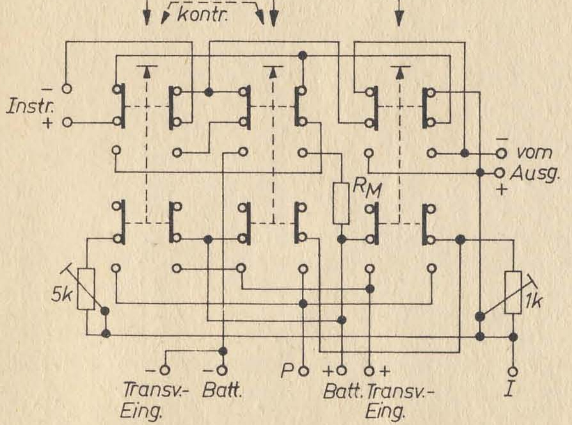
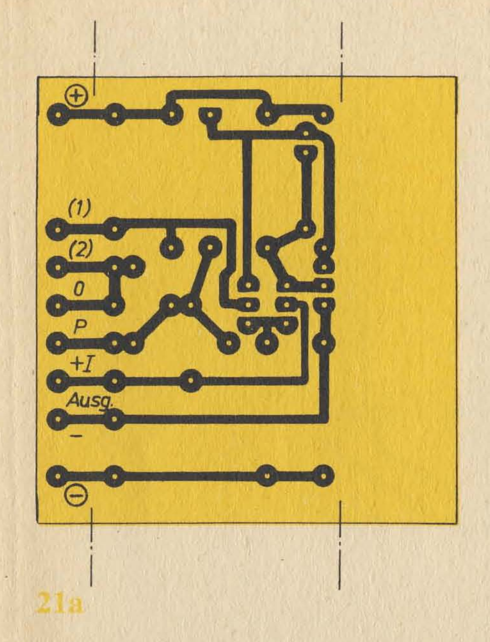


Bild 20
Beschaltung eines MT3 für Bild 19

Bild 21
Leiterplatte »Meßverstärker« zu Bild 19: a – Leiterbild, b – Bestückungsplan; Größe erlaubt bei Absägen längs der strichpunktierten Linien Einbau in Gehäuse der Tiefe 33 mm (anderes Format von »Amateurelektronik«), wenn mit nur 1 Meßbereich gearbeitet wird oder wenn statt des Tastenschalters ein kürzerer Drehschalter Verwendung findet



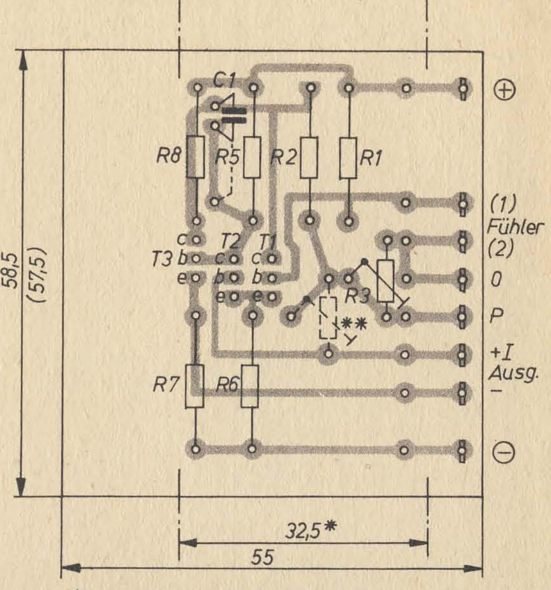
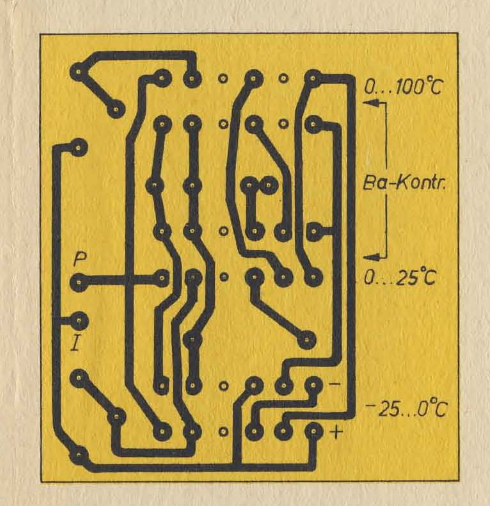
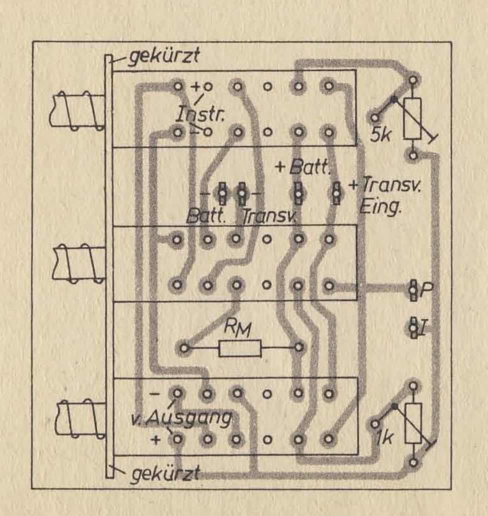
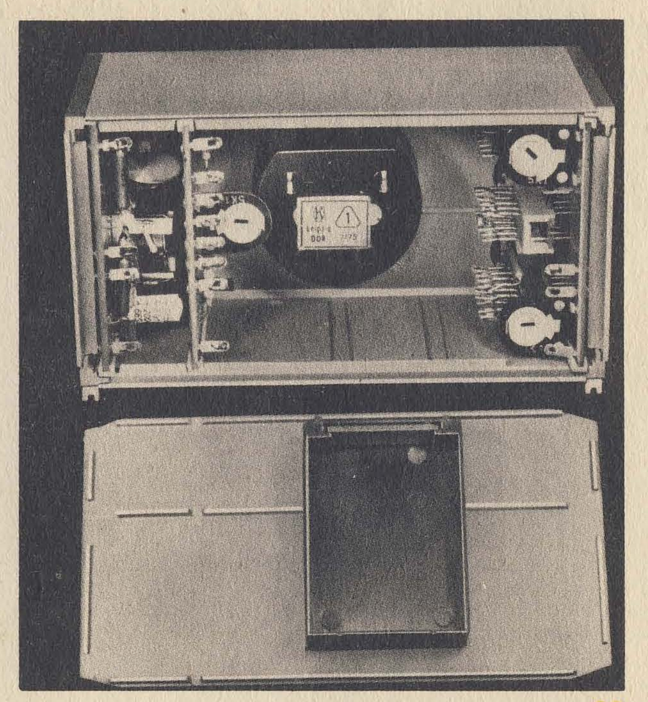


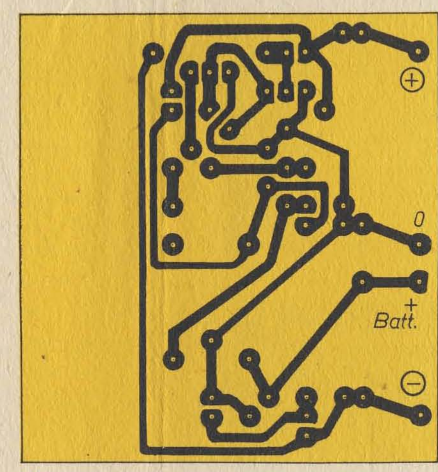
Bild 22
Leiterplatte »Schaltereinheit« zu Bild 19 für MT3, abhängig rastend: a – Leiterbild, b – Bestückungsplan





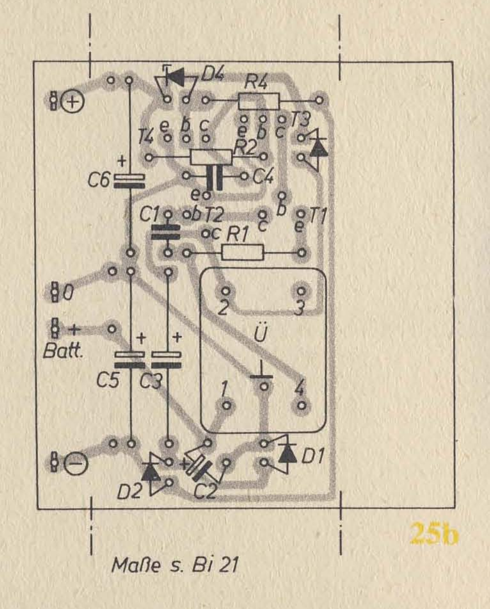


23

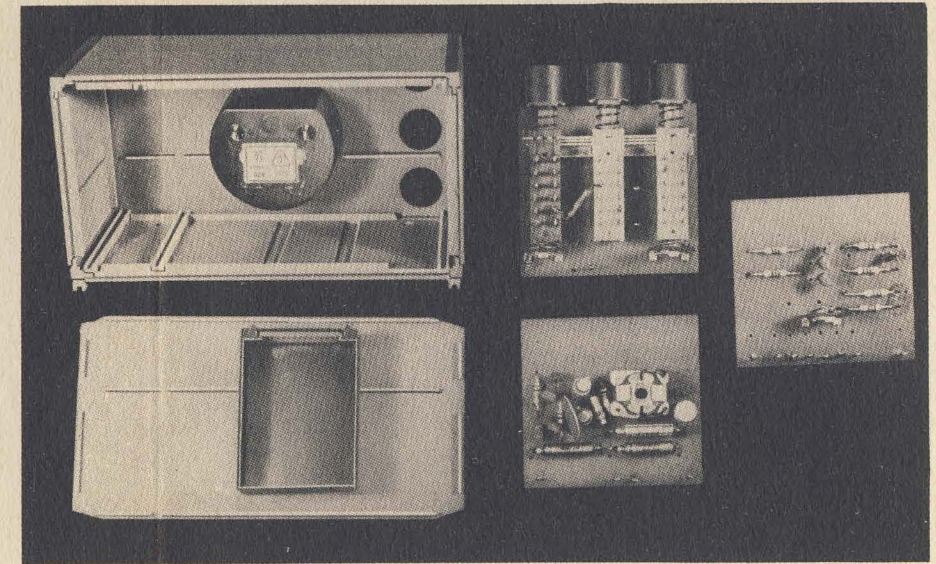




25a



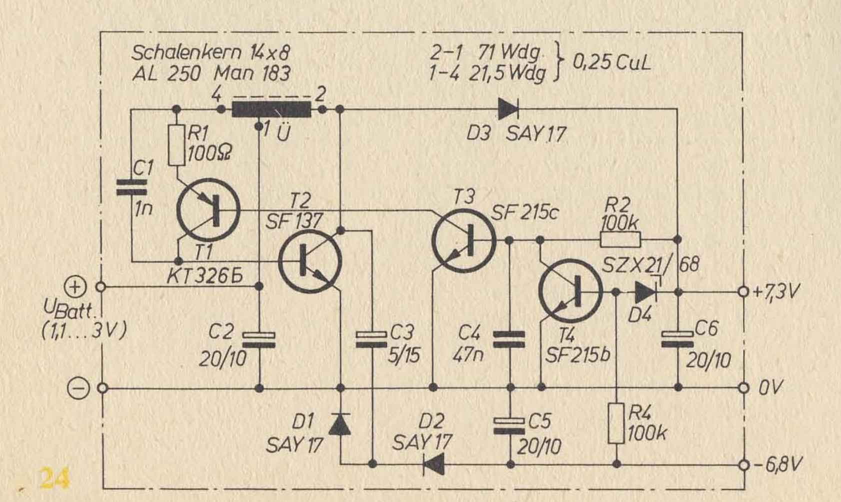
25b



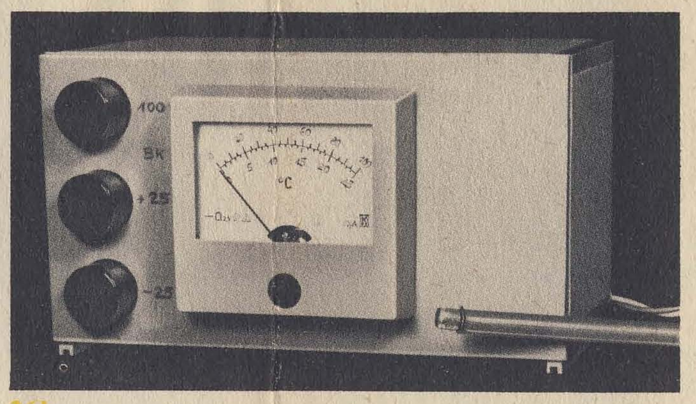
26a

Bild 23
Anordnung der Platten (einschließlich Transverterplatte nach Bild 25) in »Amateurelektronik«-Gehäuse der Größe 55 mm × 59 mm × 114 mm (Innenmaße)

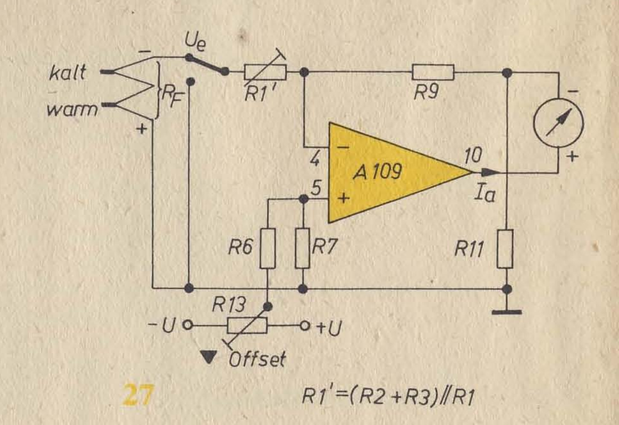
Bild 24
Transverter für das Thermometer nach Bild 19 (sowie für Bild 16 bis Bild 18); T_2 ist SF 137c, D4 ist SZX 21/6,8



24

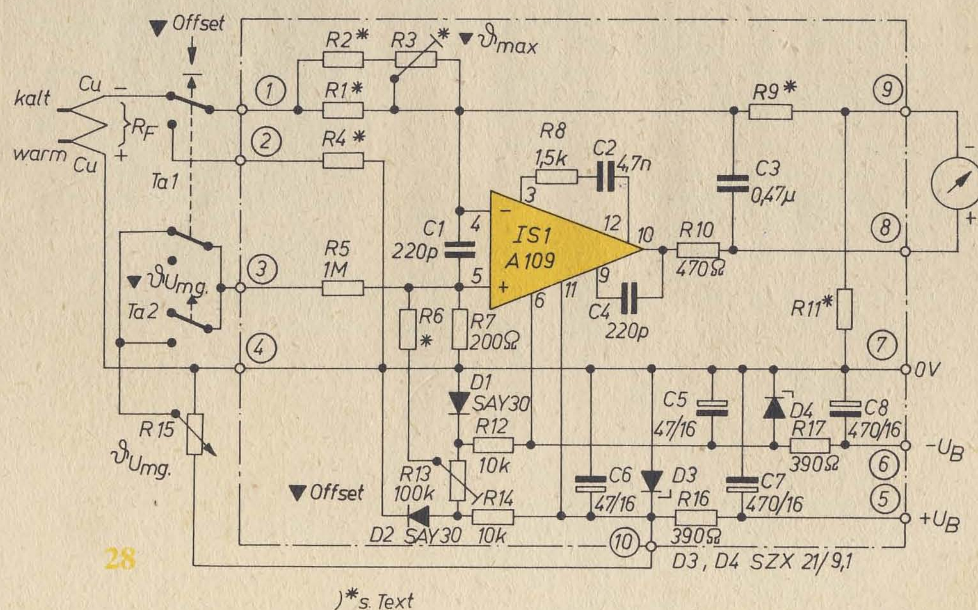


26b



27

Bild 25
a – Leiterbild, b – Bestückungsplan des Transverters nach Bild 24, wie Bild 21 auch für Gehäuse der Tiefe 33 mm modifizierbar
Bild 26
Ausführungsbeispiel des Thermometers nach Bild 19
Rechts im Vordergrund der Temperaturfühler mit SF 136 im HP-Rohr (mit Epoxidharz versiegelt)
Bild 27
Prinzipschaltung eines Differenzthermometers mit Thermoelementfühler und Operationsverstärker



28

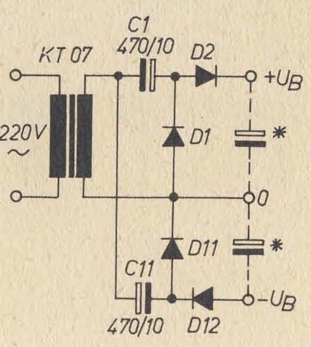
Bild 28
Vollständige Schaltung des Differenzthermometers (noch ohne Netzteil)

$$(R2 + R3)//R1 = \frac{U_e}{I_a}\left(\frac{R9}{R11} + 1\right) - R_F$$

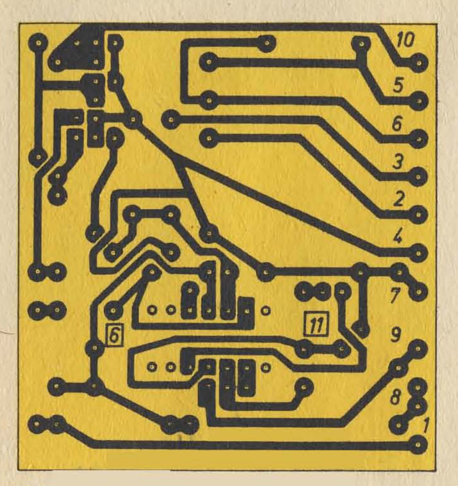
R4 erforderlich bei großem Fühlerwiderstand; R4 = Fühler-R
R6 = 20...82 kΩ, je nach Offset des IS

$$R9 = \frac{U_{a\,max}}{I_{Instr} - I_{R11}} - R10 \qquad U_{a\,max} \approx 6{,}5\ \text{V bei } U_B \pm 9\ \text{V}$$

R11 erforderlich wenn: 1. I_{Instr} zu groß, 2. Fühler-R zu groß
Bild 29
Netzteil mit Klingeltransformator für das Differenzthermometer nach Bild 28

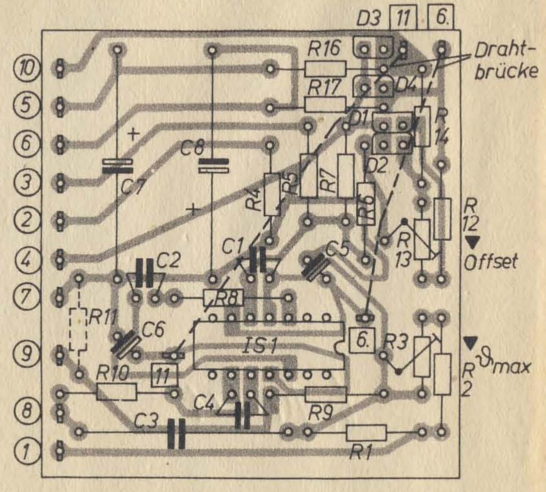


29



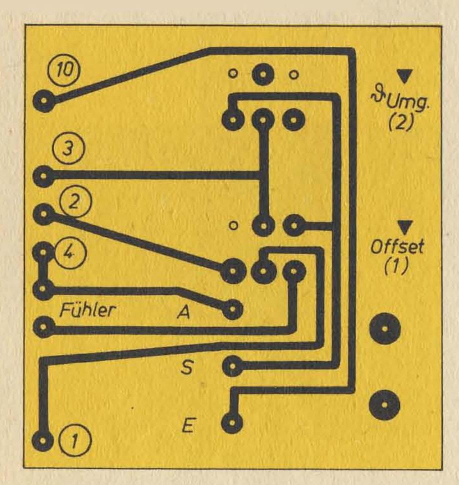
30a



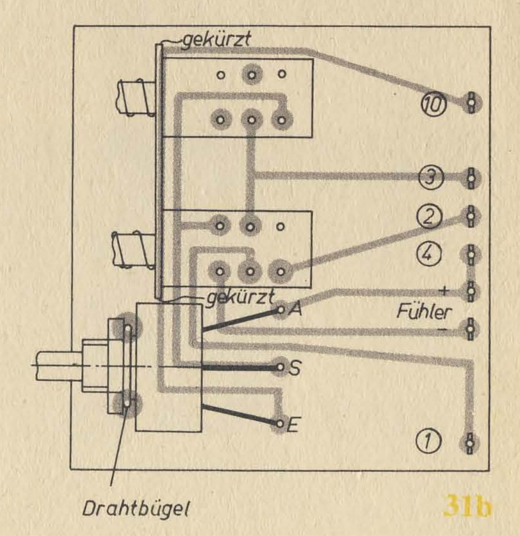


Außenmaße s. Bi. 21

30b



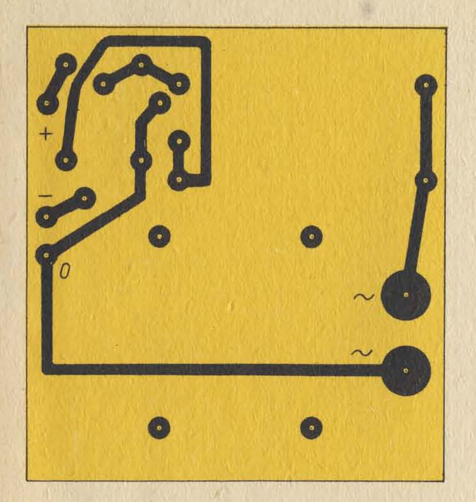
31a



31b

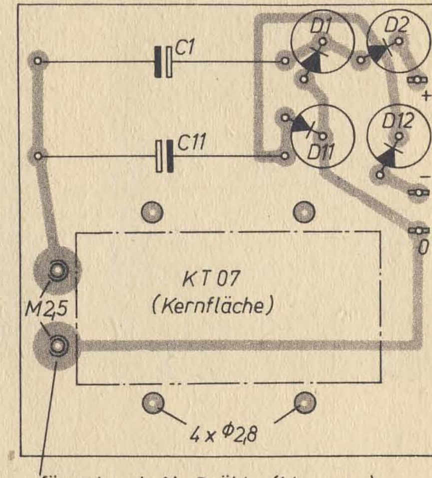
Außenmaße s. Bi. 21

Bild 30
a – Leiterbild, b – Bestückungsplan zum Verstärker des Differenzthermometers
Bild 31
a – Leiterbild, b – Bestückungsplan der Bedienplatte des Differenzthermometers mit Tastenschalter und Potentiometer für Einstellung auf Umgebungstemperatur (für Absolutanzeige)



32a

b)

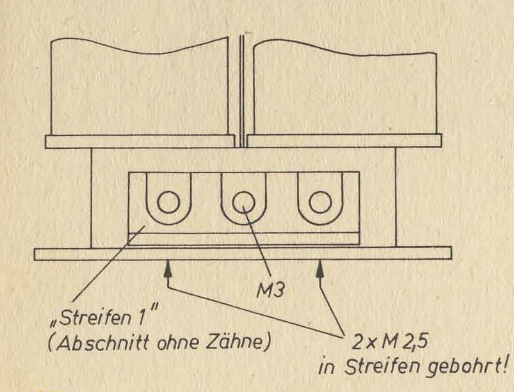


Außenmaße s. Bi. 21

32b

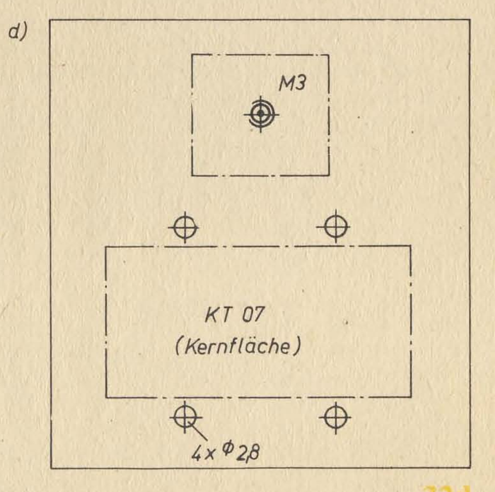
Bild 32
a – Leiterbild, b – Bestückungsplan der Netzteilplatte, c – Montage des Netztransformators, d – Netzanschlußseite

c)

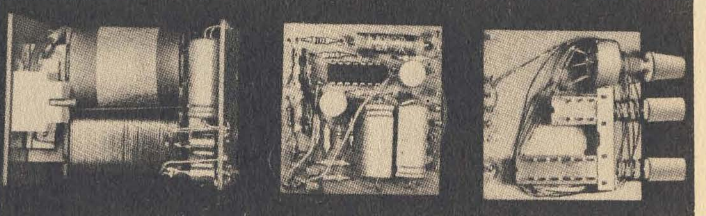


32c

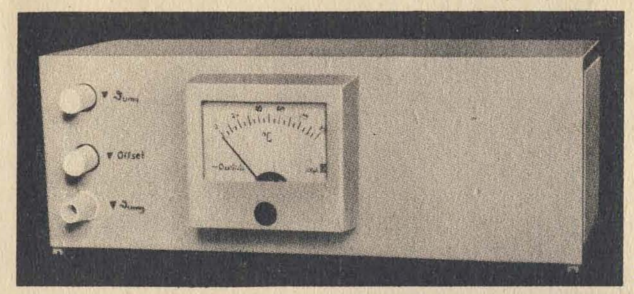
d)



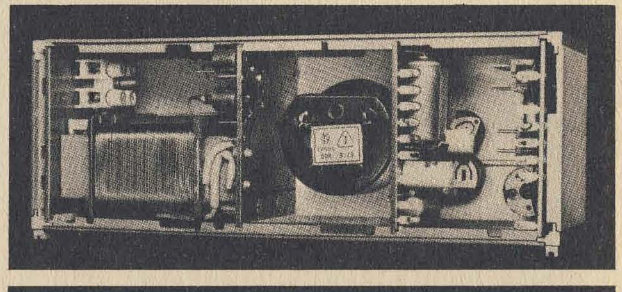
32d



33



33a



33b

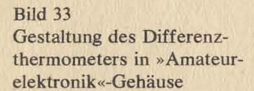


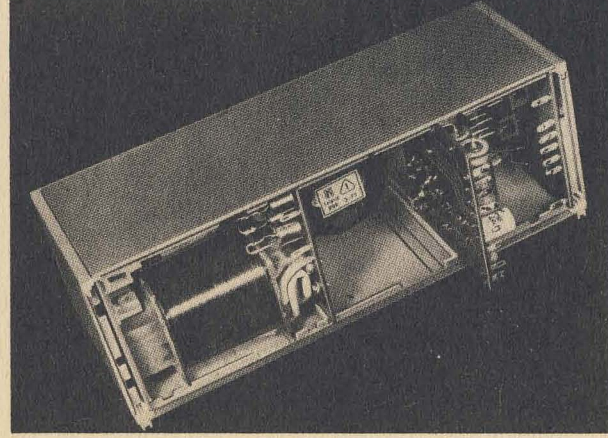
Bild 33
Gestaltung des Differenzthermometers in »Amateurelektronik«-Gehäuse

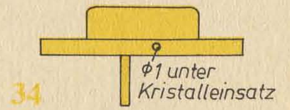
Bild 34
Fachgerecht angebohrte Bodenplatte eines Leistungstransistors zur Temperaturmessung direkt unter dem Kristall



33c

33d





34